

VŠB - Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra mechanické technologie

**Analýza tvářecích sil ohybu ocelových trubek
za studena**

**Analysis of Forming Forces by Cold Bending
of Steel Tubes**

Student:

Bc. Roman Čapek

Vedoucí diplomové práce:

prof. Ing. Jiří Hrubý, CSc.

Ostrava 2012

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra mechanické technologie

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Roman Čapek**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2303T002 Strojírenská technologie
Specializace: 20 Strojírenská technologie
Téma: **Analýza tvářecích sil ohybu ocelových trubek za studena**
Analysis of Forming Forces by Cold Bending of Steel Tubes

Zásady pro vypracování:

1. Rozbor technologií výroby trubkových oblouků velkých rozměrů.
2. Analýza tepelně mechanických parametřů ohybových procesů.
3. Stanovení základních vektorů sil působících v ohybovém zařazení
4. Provedení analýza pro materiálové reprezentanty různých legovacích konceptů.
5. Diskuze dosažených výsledků

Seznam doporučené odborné literatury:

HENZEL, A., SPITTEL, T. *Rasčet energosilovych parametrov v processach obrabotki metallov davleniem*. Moskva: METALLURGIA, 1982. s. 73
BÁLEK, S. *Tepelně technické tabulky a diagramy*. Ostrava: VŠB, 1979, 137 s.
ČABELKA, J. a kol. *Mechanická technológia*. Bratislava: VSAV, 1967. s. 594÷599
STANGE, R. *Basic tube bending guide*. Denver: Tool for bending, Inc., 1963. p. 10
SEMIATIN, S. L. a kol. *Metals Handbook Ninth Edition. Vol. 14, Forming and Forging*. Ohio, Metals Park: ASM International, 1998, p. 665÷674

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **prof. Ing. Jiří Hrubý, CSc.**

Datum zadání: 16.12.2011

Datum odevzdání: 21.05.2012




prof. Ing. Jiří Hrubý, CSc.
vedoucí katedry


prof. Ing. Radim Farana, CSc.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 21. května 2012



.....

Bc. Roman Čapek

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на ве́домі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odstavce 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на ве́домі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě 21. května 2012



.....

Bc. Roman Čapek

Temenická 13

787 01 Šumperk

Poděkování

Chtěl bych tímto poděkovat vedoucímu diplomové práce panu prof. Ing. Jiřímu Hrubému, CSc. za jeho cenné rady a vstřícný přístup při poskytování informací, nezbytných pro vypracování této diplomové práce.

Bc. Čapek Roman

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

ČAPEK, R. *Analýza tvářecích sil ohybu ocelových trubek za studena: diplomová práce.*

Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní,

Katedra mechanické technologie, Ústav tváření, 2012, 53s.

Vedoucí diplomové práce: Hrubý, J.

Tato diplomová práce se soustřeďuje na analýzu tvářecích sil při ohybu ocelových trubek za studena. Analýza byla provedena pro dva materiálové reprezentanty oceli s označením 16CrMo4 a ocel třídy C35. Analyzovanou součástí jsou trubky o rozměrech 273 x 16 mm ohnuté na poloměr rovnající se pětinasobku průměru trubky (1365 mm). K provedení analýzy pomocí MKP byl použit software QForm. Diplomová práce obsahuje informace o technologiích ohýbání trubek, popis dějů vznikajících při tváření a výsledky numerické analýzy MKP.

ANNOTATION OF MASTER THESIS

ČAPEK, R. *Analysis of Forming Forces by Cold Bending of Steel Tubes: Master Thesis*

Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical

Engineering, Department of Mechanical Engineering Technology, Institute of Metal Forming, 2012, 53 pp.

Thesis head: Hrubý, J.

This dissertation thesis describes an analysis of forces caused by steel tubes movement. I have done analysis for two kinds of steel material called “16CrMo4”, and “C35”. The analyzed tubes of a size 273 x 16 mm were being bent until the bend radius reached size of a five-time-size of an average of the tube (1365 mm). The “Q-Form” software was used for the performance of this analysis. This thesis brings information about the tubes bending, description of the whole process and result of the MKP numeric analysis.

Obsah

Obsah	7
Seznam symbolů a zkratk použitých v textu	8
Úvod	10
1 Rozbor technologií výroby trubkových oblouků velkých rozměrů	11
1.1 Základní postupy výroby trubek	11
1.2 Výroba trubkových oblouků větších rozměrů	12
1.3 Princip ohýbání trubek	13
1.4 Ohyb trubek za studena a za tepla	15
1.5 Metody ohýbání trubek	15
2 Analýza tepelně mechanických parametrů ohybových procesů	21
2.1 Teplotní jevy při tváření	21
2.2 Mechanické jevy při ohýbání	24
2.3 Analýza tepelně mechanických parametrů ohybu s využitím metody MKP	29
3 Stanovení základních vektorů sil působících v ohybovém zařízení	43
4 Analýza pro materiálové reprezentanty různých legovacích konceptů	48
5 Diskuze dosažených výsledků	52
6 Závěr	52
7 Použitá literatura a zdroje	53

Seznam symbolů a zkratk použitých v textu

α	úhel ohybu trubky	(°)
δ	úhel odpružení	(°)
σ_d	tlakové napětí	(MPa)
σ_p	přetvárný odpor v ohybu	(MPa)
σ_t	tahové napětí	(MPa)
a	vzdálenost vln	(mm)
d	vnitřní průměr trubky	(mm)
D	vnější průměr trubky	(mm)
Dr	zmenšení průměru trubky	(mm)
Dp	zvětšení průměru trubky	(mm)
e	deformace	()
E	modul pružnosti	(MPa)
F	síla	(Nm)
hm	střední výška sousedních vln	(mm)
k	součinitel	()
L	délka	(mm)
Mo	ohybový moment	(Nm)
O	ovalita trubky	(%)
P	tlaková síla	(Nm)

r	poloměr ohybu neutrální osy	(mm)
rm	vnitřní poloměr trubky	(mm)
rs	střední poloměr trubky	(mm)
rv	vnější poloměr trubky	(mm)
R	poloměr ohybu	(mm)
Re	mez kluzu	(MPa)
Rm	mez pevnosti	(MPa)
Rv	poloměr ohybu vnějších krajních vláken	(mm)
Rvn	poloměr ohybu vnitřních krajních vláken	(mm)
s	tloušťka stěny	(mm)
t	tloušťka materiálu	(mm)
T	teplota	(°C)
Ttav	teplot tavení	(°C)
x	součinitel posunutí neutrální osy	()
W	modul průřezu v ohybu	(mm)

Úvod

Tato diplomová práce je na téma analýza tvářecích sil ohybu ocelových trubek za studena. Jak vyplývá z názvu práce, budeme se zabírat procesy, které probíhají během ohýbání trubek. Velká rozmanitost použití trubek v praxi ovšem vyžaduje nutnost bohatého trubkového sortimentu rozličných rozměrů. Jedná se o rozměry v rozsahu od 10 - 150 mm (malé průměry) do 150 - 1020 mm (velké průměry). Trubky se využívají jako konstrukční materiály, a také zároveň jako polotovary pro výrobu nejrůznějších druhů potrubí. Ať už jsou trubky používány jako konstrukční materiál nebo jako polotovar. V mnoha případech je potřebujeme vhodně tvarovat. Jedním ze způsobů tvarování je i ohyb trubek. Při ohýbání působí na ohýbaný díl velké množství sil a jejich momentů. Tyto síly se do značné míry mění podle druhu tvářeného materiálu. Materiál a rozměry trubky jsou určujícími faktory k volbě správného stroje pro vytvoření kvalitního ohybu.

V této práci bych se chtěl zabývat možností analýzy ohybu trubek za pomoci počítačových simulací metodou konečných prvků. Tato metoda výrazně snižuje čas potřebný ke správnému určení vhodného materiálu trubky a k volbě správné technologie ohybu trubky. Předmětem analýzy budou dva materiály rozdílných vlastností. Jedná se o trubky vyrobené z oceli C35 a 16CrMo4. V diplomové práci zároveň zkouším využít technologii ohýbání pomocí páky místo klasického ohybu přes otočnou kladku.

1 Rozbor technologií výroby trubkových oblouků velkých rozměrů

1.1 Základní postupy výroby trubek

Trubky se v praxi používají v mnoha rozmanitých oborech. Trubku si lze představit jako profilovaný díl s uzavřenou dutinou. Jsou využívány například jako konstrukční materiály a také jako polotovary. Vyrábějí se z nich ocelové konstrukce ve stavebnictví, v dopravě, v chemickém, potravinářském a energetickém průmyslu. Při konstrukčních řešeních se využívá výhody vysoké tuhosti a lehkosti trubek. Trubky jsou samozřejmě také polotovary vhodné k vytvoření potrubí pomocí, kterého přepravujeme sypká nebo kapalná média (např. olej, ropa, plyn, voda nebo vzduch). Potrubní systémy tvoří jen přímé trubky, ale také nejrůznější tvarovky. Nejčastěji se jedná o oblouky, které jsou většinou vyrobeny z rovinných trubek.

Trubky jsou během provozu vystavovány mechanickému namáhání vnějšími i vnitřními silami. Jedná se o namáhání tahem, tlakem, kroucením, smykem a také ohybem. Dalším podstatným vlivem ovlivňujícím funkčnost trubek jsou teplotní a chemické vlivy působící na trubky. V praxi se setkáváme s kombinací všech těchto vlivů.

Nejčastější požadavky na trubky jsou tyto:

- Stálost tvaru trubky v oblastech pružné deformace při působení vnějších sil.
- Pevnost a stálost trubky za působení vnějších sil, momentů a teploty zároveň.
- Odolnost proti otěru a korozi.
- Elektrická a tepelná vodivost nebo naopak nevodivost.
- Klasické technologické požadavky jako je pružnost, obrobiteľnosť, tvárnosť a ďalší.
- Materiálem vhodným pro výrobu trubek jsou právě oceli, které splňují výše popsané požadavky.

1.2 Výroba trubkových oblouků větších rozměrů

Nejpoužívanější metodou výroby trubkových oblouků je výroba pomocí tváření rovných trubek. Většina principů tváření jsou stejné jak pro trubky s menšími průměry, tak pro trubky s většími průměry. Rozdíly jsou v tváření za studena a za tepla. Jednou z možností tváření trubek je ohyb, který splňuje požadavky v průmyslových zařízeních na různé tvary trubek. Z geometrického hlediska rozdělujeme ohyby na tři způsoby. Jsou to ohyby v rovině vyskytující se v potrubí vedeném ve volném prostředí. Druhý způsob jsou ohyby v několika rovinách, které se vyskytují tam, kde je nutné trubku přizpůsobit nějakému stroji nebo zařízení. Třetím způsobem jsou ohyby prostorové zajišťující technologickou funkci výrobku, například spirála topení nebo různé trubkové šroubovice.

Použitím jednotlivých metod ohýbání trubek jsme schopni dosáhnout různých výsledků. K určení správné metody ohýbání je nutné znát materiál, z kterého je trubka vyrobena, rozměr trubky a požadovaný poloměr ohybu trubky. Příklady ohybu silnostěnných trubek jsou uvedeny na obrázku číslo 1.1. Z vlastností materiálu jsem schopni zjistit jeho mechanické vlastnosti, například tažnost a pevnost. Zvolená metoda ohybu by měla zajistit dodržení požadovaných vlastností (hladký ohyb, nezvlněná vnitřní strana ohybu, atd.). Při volbě správné metody ohýbání konstruktér přihlíží k tvarům konečného výrobku a také k možnostem ohýbacích strojů. Během let vzniklo velké množství způsobů ohýbání a smyslem této práce není vytvoření přehledu všech metod, ale jen malý průřez ohýbacími metodami [10].

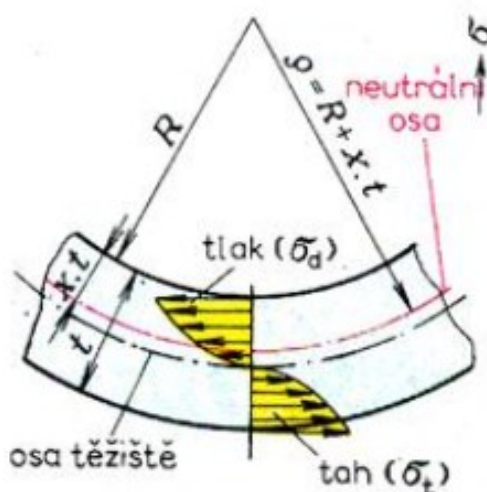


Obr. 1.1 Příklady ohybů trubek (530 mm) [10]

1.3 Princip ohýbání trubek

Ohýbání trubek patří do technologie tváření materiálů a jedná se o plošné tváření při kterém je materiál trvale deformován do požadovaného tvaru. Při ohybu je materiál deformován ve dvou směrech a při procesu je využíváno zákonů plasticity. Po překročení meze kluzu dosáhneme plastické deformace. V průběhu ohybu má plastická deformace různý průběh (od povrchu materiálu k neutrální ose).

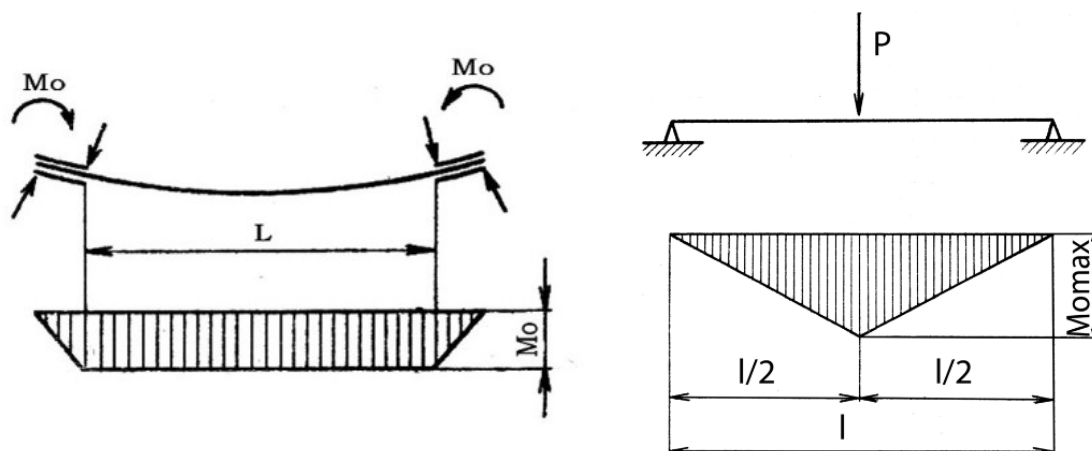
Deformace vyšších průřezů se projevuje více než u nižších průřezů. Stěny silnostěnných trubek jsou odolnější deformaci v příčném směru, protože odpor materiálu je vyšší než u tenkostěnných trubek. Ve středové části deformovaného materiálu jsou tahová napětí malá a dosahují nižších hodnot než je mez kluzu daného materiálu. Ve středové oblasti je místo, ve kterém není žádné napětí a materiál se zde neprodlužuje ani nezkracuje. Toto místo je nazýváno jako neutrální osa a je znázorněna na obrázku číslo 1.2. Neutrální osa je před ohybem ve středu deformovaného materiálu a po deformaci se posouvá k vnitřní straně ohybu.



Obr. 1.2 Průběh napětí a neutrální osa při ohybu [1][4]

Ohýbání trubek vyžaduje obvykle dosažení stejného poloměru v průběhu celého ohybu trubky. Pro toto dosažení je nutné rovnoměrné působení stejného ohybového momentu v celé délce ohybu. Druhým možným způsobem je postupné ohýbání při kterém ohybový moment a ohybové síly mění svá působíště [1], [4].

Ohýbání pomocí ohybového momentu je schematicky znázorněno na obrázku číslo 1.3. Obrázek znázorňuje ohybový moment působící na ohýbanou trubku v celé délce konstantě. Konstantní působení ohybového momentu zajistí rovnoměrný ohyb požadovaného poloměru [3].



Obr. 1.3 Ohyb za pomoci ohybového momentu a ohyb pomoci příčných sil a ohybového momentu [3]

Předpoklad rovnoměrného ohnutí, platí jen v oblastech pružné deformace. Po překročení meze kluzu materiálu se průběh ohýbacího procesu změni. Začne se projevovat nehomogenita materiálu a také odchylky tvaru materiálu. Na vnějších vláknech dochází k vysokému tváření, vlákna se prodlužují a na opačné straně se zkracují. Tento jev zapříčiňuje zborcení průřezu trubek. Ke zborcení trubek přispívají také síly, které se snaží průřez trubky zplošťovat. Díky těmto vlastnostem se tento způsob ohybu hodí pro ohýbání velkých průměrů trubek při velkém poloměru ohybu.

Na obrázku číslo 1.3 je také znázorněno ohýbání pomocí ohybového momentu vyvolaného příčnými silami. Trubka je dle schématu na obrázku ohýbána silou působící na stěnu trubky a její působíště zůstává v jednom místě. Tímto způsobem ohýbání trubek nedochází k rovnoměrnému rozložení ohybového momentu po celé délce poloměru ohybu. Ohybový moment vzrůstá od krajních podpěr až ke svému maximu pod působící silou. Tento způsob ohýbání se využívá k ohybům vzniklým v lisech, kde tvar ohnuté trubky se přizpůsobuje tvárniku lisu [3].

Dalo by se říci, že všechny ohýbací stroje pracují na principu působení sil a momentů popsaných na předešlých obrázcích. Tyto dva druhy působení sil a momentů se v praxi využívají a zároveň také jejich různé kombinace [3].

1.4 Ohyb trubek za studena a za tepla

Ohýbání trubek je proces plošného tváření jako mnoho jiných procesů plošného tváření. Při tváření dochází k deformaci tvářeného materiálu. Čím větší tloušťka stěny trubky, tím větší sílu musíme vyvinout při ohýbání, abychom dosáhli žádané deformace. Pro zmenšení tvářecích sil volíme vhodné materiály a také využíváme při tváření vhodné teploty. Ohřevem materiálu dosáhneme zlepšení plastických vlastností a deformační odpor se také zmenší. Všeobecně rozdělujeme tváření za použití teplot na tváření za studena a za tepla [5].

Tváření za studena probíhá při teplotách nižších než je teplota rekrytalizace materiálu. Hranice teploty tváření za studena je $0,3 T_{tav}$. Při těchto teplotách nedojde k obnovení zdeformované krystalické mřížky materiálu. Tvářením za studena se mění fyzikální a mechanické vlastnosti materiálu[5].

Tváření za tepla probíhá při teplotách vyšších než $0,7 T_{tav}$. a deformační procesy probíhají nad teplotou rekrytalizace. Při tváření za tepla klesá pevnost materiálu a tím i potřebné síly na ohyb [5].

1.5 Metody ohýbání trubek

Do dnešních dnů byla vymyšlena celá řada metod a způsobů jak trubky co nejlépe a nejrychleji ohýbat. Úkolem této práce není všechny metody ohýbání popsat a proto zde uvedu jen některé z nich. Uváděné metody se běžně používají v dnešním průmyslu.

Ruční ohýbání

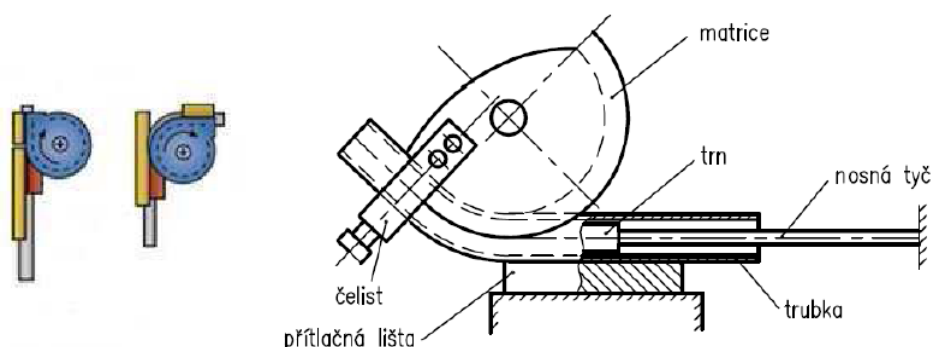
Tato technologie se používá dodnes především pro drobné a jednoduché práce s trubkami. Využívají je například topenářské a vodoinstalační firmy. Ruční ohýbání lze samozřejmě použít jen na trubky menších rozměrů. Pro zvýšení ohýbací síly stroje je využíváno mechanických pák a systémů kladek. Na obrázku číslo 1.4 je znázorněna jednoduchá ruční ohýbačka [2].



Obr. 1.4 Ruční technologie ohýbání [2]

Ohýbání trubek navíjením

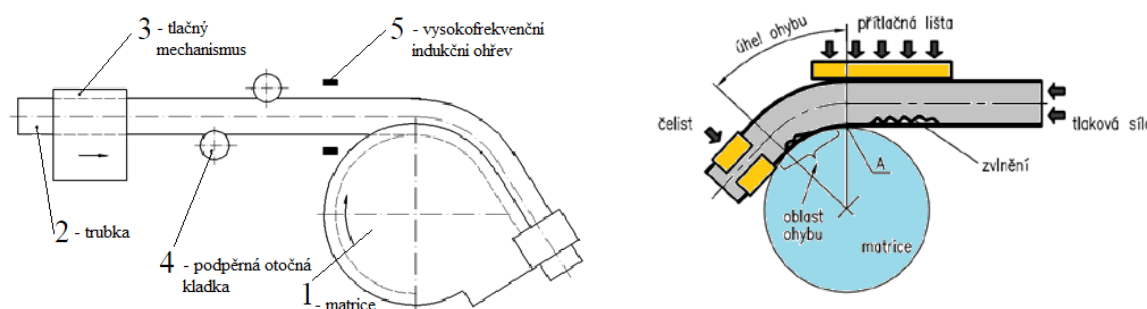
Jedná se o technologii která využívá strojního vybavení. Tento způsob ohýbání je realizován rotující matricí s upínacím mechanismem. Trubka je pevně připevněna k pohyblivé matici a trubka se na matici navíjí. Metoda je využívána pro tenkostěnné trubky a malé poloměry ohybu. Pro lepší provedení ohybu je trubku nutné přidržovat pomocí přitlačných lišt. Lišty jsou buďto pevné nebo pohyblivé. Při pevných lištách musíme počítat s třením pohybující se trubky. Pohyblivá lišta je lepší variantou z důvodu delšího kontaktu s trubicí. Poskytuje trubce přesnější vedení a eliminuje tření, které je příčinou různých problémů. Navíjení je rozšířená metoda ohýbání a lze ji využívat pro trubky o rozměrech 12 až 290 mm. Metoda se používá pro strojní ohýbačky. Na obrázku číslo 1.5 je vyobrazeno schéma ohýbání navíjením i s popsány díly ohýbačky [2].



Obr. 1.5 Ohyb trubek navíjením [2]

Kombinované ohýbání za pomoci tlakové síly

Jedním z nepříznivých jevů ohýbání trubek je ztenčení stěny ohýbané trubky na vnějším poloměru. Tento jev vzniká při ohýbání konvenčními metodami a má nepříznivý vliv na strukturu povrchu na kterém mohou vznikat trhliny. Pro zmírnění ztenčení stěny trubky je vhodná právě tato metoda ohybu za pomoci tlakové síly. Princip ohybu je podobný jak u předchozí metody až na jeden rozdíl. Trubka není vtahována na ohýbací matrici, ale je na ni natlačována silou působící na konci trubky.

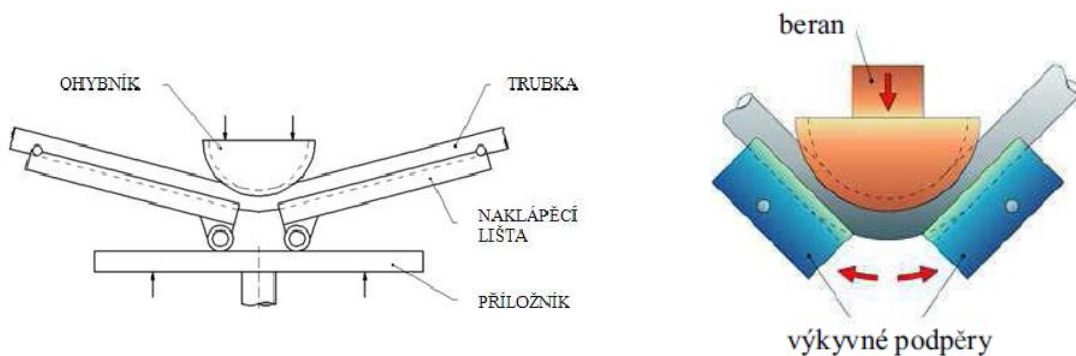


Obr. 1.6 Ohyb trubky za pomoci tlakové síly a ohřevu [4],[2]

Metoda ohybu může být kombinovaná s vysokofrekvenčním ohřevem trubky v místě ohybu. Ohřev je využíván pro silnostěnné trubky a trubky s mechanickými vlastnostmi vyžadující ohřev. Při použití ohřevu získáme větší plasticitu materiálu (tvárnosti) a snižuje se velikost potřebných sil k tváření. Dále při použití ohřevu snižujeme hodnotu odpružení. K záporným jevům patří možnost tvorby zvlnění vnitřní stěny trubky před místem ohybu. Pro lepší představu principu ohybů je přiložen obrázek číslo 1.6 [4], [2].

Ohýbání pomocí beranu a lisu

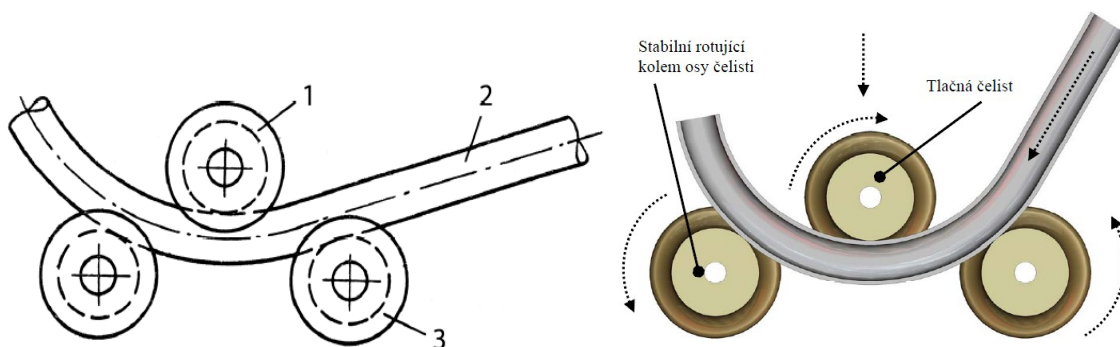
Jedna z nejjednodušších metod ohybu trubek je ohyb za pomoci hydraulických lisů. Ohyb na lisu vzniká pomocí beranu a dvou podpěr. Na přípravku je uložena trubka a pomocí pohybu lisu s beranem se trubka ohýbá. Ohýbání pomocí lisu limitují síly, které dokáže lis vyprodukovat a musí se počítat s distorzí tvaru ohnuté trubky. Metoda je vhodná pro díly u kterých není nutná vysoká přesnost tvaru ohnutého dílce. Ohýbání za pomoci lisu umožňuje výrobu ohnutých dílců o vysoké produkci. Princip je znázorněn na obrázku číslo 1.7 [4], [2].



Obr. 1.7 Ohyb trubky za pomoci lisu [4],[2]

Ohýbání zakružováním

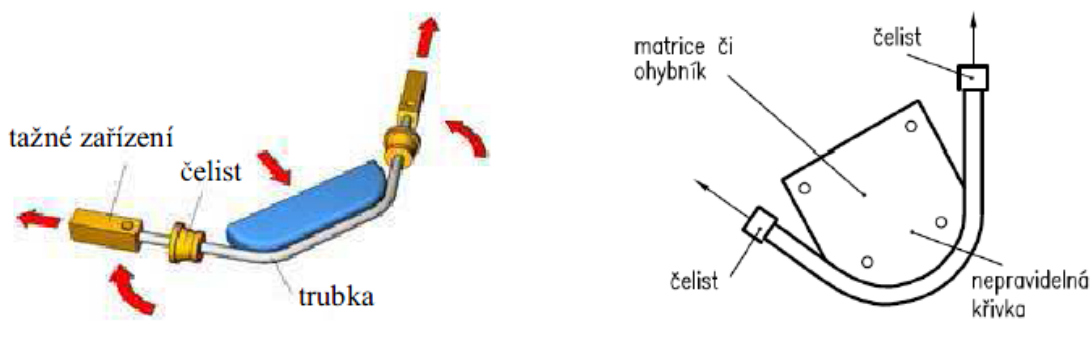
Metoda ohýbání zakružováním využívá k ohybu trubky soustavu otočných kladek. Rozmístění kladek určuje jak bude ohyb trubek vypadat. Ohybový moment je vyvozen silami kolmými k ose trubky, které mění své působíště vzhledem k ohýbané trubce. Pohyb trubky mezi kladkami může být pomocí tlačného mechanismu nebo kladky samotné vtahují trubku mezi ohýbací kotouče. Na technologii zakružování je možné využít i ohyb pomocí kroutícího momentu, který umožňuje ohyby trubek ve šroubovici. Zakružovačky známe jako tříkladkové a vícekladkové a symetrické i nesymetrické (rozhoduje postavení kladek). Zakružovačky se používají jak pro trubky o malých průměrech tak pro trubky velkých průměrů. Pro ohýbání silnostěnných trubek je možné použít indukční předehřev ohýbané trubky. Tato technologie je pro svou spolehlivost a univerzálnost často využívána. Na obrázku číslo 1.8 je znázorněn princip ohybu pomocí zakružování [3].



Obr. 1.8 Ohýbání trubky zakružováním [3]

Ohýbání vypínáním

Technologie ohýbání pomocí vypínání se používá ve většině případů pro ohyb trubek s nepravidelným poloměrem a velkými poloměry s malým zakřivením. Při této technologii ohybu využíváme tahové síly, která polotovar přetahuje přes tvářecí trn. Princip je tedy velmi jednoduchý. Trubka je pevně přichycena na dvou koncích a tažena proti tažníku. Vzniká tahové napětí působící v celém průřezu trubky což snižuje následné odpružení materiálu. Výhod této metody ohýbání je několik a jednou z nich je možnost dosáhnout požadovaného tvaru ohybu za jednu pracovní operaci. Z toho plyne další výhoda - úspora času na ohyb. Vypínání je také vhodné pro nekruhové profily trubek. Proti nadměrnému zborcení stěn je možné použít výplň. Nevýhody metody pramení z principu stroje. Stroj je dražší a vyžaduje kvalitní upínací mechanismus. Pro lepší představu je princip uveden na obrázek číslo 1.9 ohyb pomocí vypínání [2].

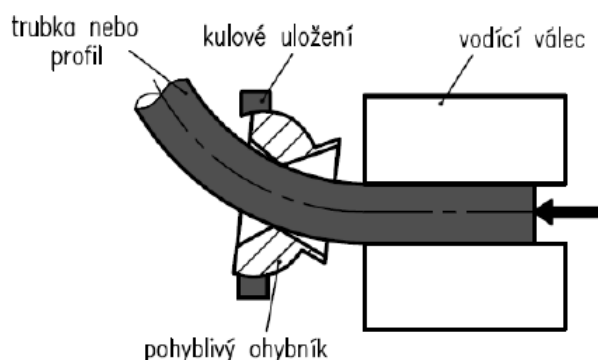


Obr. 1.9 Ohyb trubky vypínáním [2]

Ohyb pomocí Laserového paprsku a flexibilní ohýbání

Tyto dvě technologie ohýbání trubek nepatří k běžně používaným technologiím. Patří mezi nekonvenční technologie ohýbání trubek. Princip Laserového ohýbání je založen na tepelné roztažnosti materiálu a tlakovém napětí. Laserový paprsek ohřeje lokální místo na vnější straně trubky, která se otáčí. Trubka podléhá plastické tlakové deformaci a zesílení stěny v důsledku omezené teplotní roztažnosti okolního materiálu. Zkrácení tepelně ovlivněné oblasti způsobí ohyb materiálu. Podle toho jaký potřebujeme poloměr ohybu musíme součást ohřívat a ochlazovat. Metoda má nevýhodu v dlouhém procesu ohýbání a finanční náročnosti.

Druhou technologií je nový patentovaný způsob ohybu trubek zvaný flexibilní ohýbání trubek. Princip metody využívá tlační síly, která tlačí trubku pohyblivým ohybníkem. Poloměr ohybu a úhel ohybu je závislý na pootočení pohyblivého ohybníku od pevného válce. Výhodou metody je možnost výroby složitých prostorových ohybů. Samozřejmě, že metodu lze využít jen pro trubky s menšími průměry, ale je velice zajímavá a proto ji zde uvádím. Schéma flexibilního ohýbání je na obrázku číslo 1.10. [2]



Obr. 1.10 Ohyb trubky flexibilní metodou [2]

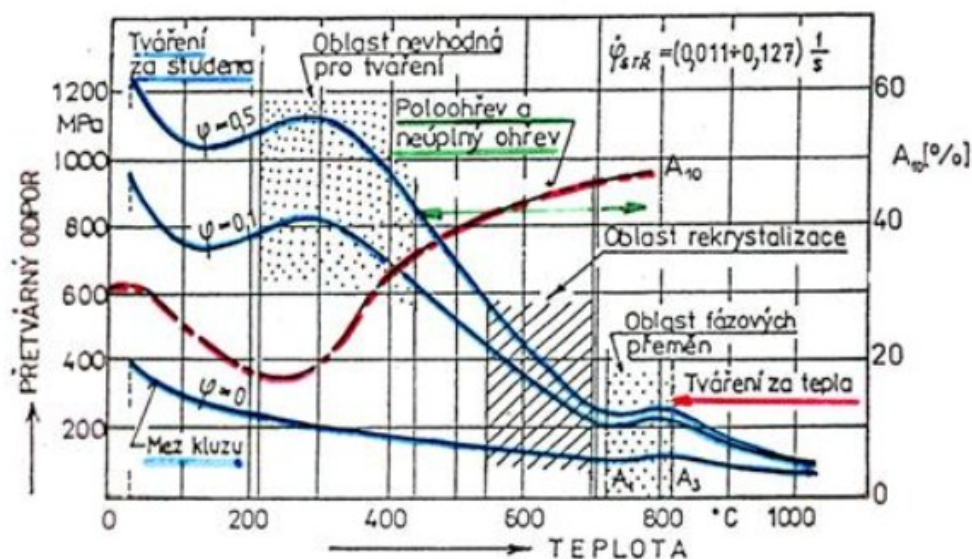
Jak je zřejmé z výše uvedeného textu, existuje celá řada metod a technologií ohýbání trubek. I když jsou dnešní moderní stroje výkonné a přesné, ne každá metoda ohybu trubek se dá použít na trubky malých rozměrů a zároveň trubky velkých průměrů. Z uvedených metod se dají použít pro ohyb trubek velkých rozměrů nejčastěji metody zakružování, nabalování a navíjení. Pro silnostěnné trubky se také využívá možnosti ohřevu materiálu. Některé ohýbací stroje pro velké průměry trubek kombinují několik principů ohybů dohromady.

2 Analýza tepelně mechanických parametrů ohybových procesů

Ohýbání je technologie tváření kovů, při kterém dochází k požadované změně tvaru ohýbané trubky. Při ohýbání těles využíváme stejných zákonů plasticity, jako u ostatních způsobů tváření. Změnu tvaru nám tedy umožňuje vznik plastické deformace v okamžiku dosažení napětí na mezi kluzu. Při ohýbání převládá deformace ve dvou směrech a proto mluvíme o ohýbání jako o plošném tváření materiálu. Deformace materiálu je provázena fyzikálními změnami, včetně změny vnitřní struktury materiálu. Tyto změny ovlivňují mechanické vlastnosti materiálu jako je například pevnost, tvrdost, tvárnost, houževnatost a také geometrické změny tvaru výrobku. Pro určení průběhu jednotlivých jevů vyskytujících se při plošném tváření provádíme analýzy teplotních a mechanických procesů při ohybu. K dosažení přesné a dobré analýzy je nutné znát alespoň základní informace probíhajících jevů v procesu ohýbání. Nejprve se soustředíme na teplotní jevy při tváření a poté na mechanické jevy vznikající při ohybu.

2.1 Teplotní jevy při tváření

Při ohýbání trubek, jak jsme si už řekli, využíváme plastických vlastností kovů. Na plastičnost kovů má zásadní vliv teplota, při které se materiál tváří. Můžeme říci, že za vyšších teplot lze materiál snadněji tvářet, protože se sníží odpor materiálu proti deformacím. V technické praxi se setkáváme s jednoduchým rozdělením metod tváření za pomoci teploty na tváření za tepla a tváření za studena. Rozdělení tvářecích procesů dle teploty je vlastně dělení podle vztahu teploty tvářeného materiálu a teplotou rekrytalizační. Teplota rekrytalizace je přibližně $0,4 T_{\text{tav}}$ kovu a dochází při ní k regeneraci zdeformovaných zrn vnitřní struktury kovů. Na obrázku číslo 2.1 je znázorněn graf rozdělení tvářecích procesů [12].



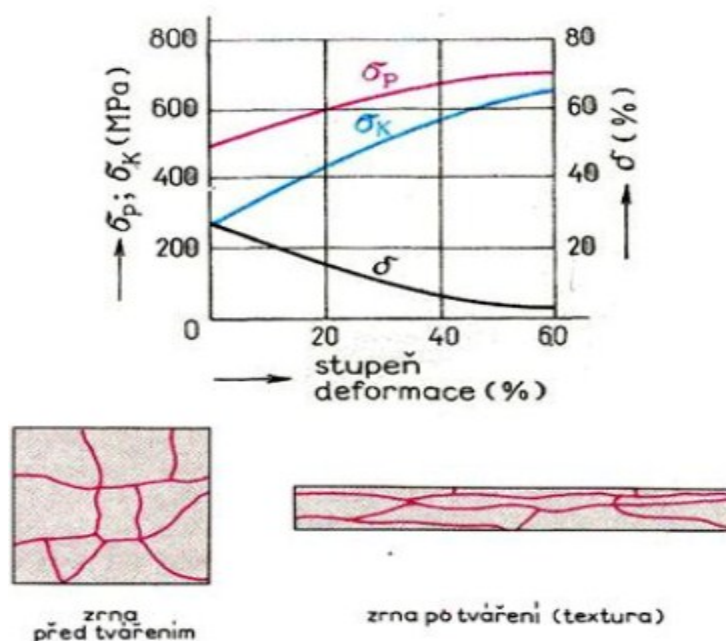
Obr. 2.1 Graf rozdělení tvářecích procesů [12]

2.1.1 Tváření za tepla

Probíhá nad rekrytalizační teplotou, kdy rychlost rekrytalizace je tak vysoká, že zpevnění způsobené tvářením mizí již v průběhu tváření a nebo bezprostředně po něm. Teplota tváření je nad hodnotou 70 % teploty tání daného materiálu. Materiál se nezpevňuje a k tváření stačí síly až desetkrát menší, než u tváření za studena. Může a nemusí vznikat textura, ale povrch je nekvalitní vlivem okujení. Navíc hrubné zrna, což je problematické u dalších technologických operací z hlediska kvality. Proces je poměrně zdoluhavý a nákladný, na druhé straně však dochází k odstranění trhlin, bublin, atd. Dalším vlivem tváření za tepla je vznik vláknité struktury z hrubé dendritické struktury ingotu. Vlákňitou strukturu je nemožné změnit tepelným zpracováním a ani tvářením. Vlákňitá struktura ovlivňuje mechanické vlastnosti a anizotropii. Vzniká v důsledku nečistot, obsažených v povrchových vrstvách krystalů. Velikost zrna při tváření ovlivňuje výše teploty a velikost plastické deformace. Při tváření malými stupni deformace vzniká nebezpečí kritického růstu zrna a výsledkem je nerovnoměrná deformace v celém průřezu. Deformace se koncentruje pouze do určité hloubky a dochází k rozdílnému průběhu deformací spojených se vznikem tahového napětí [5], [12].

2.1.2 Tváření za studena

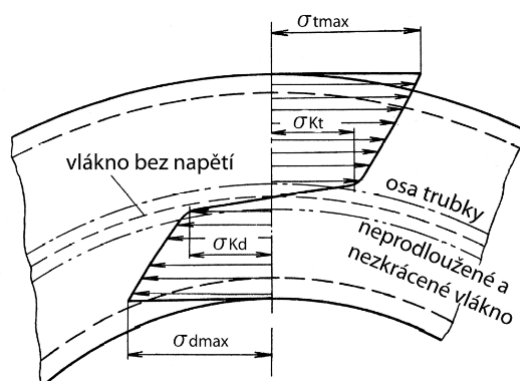
Je vlastně tváření pod rekrystalizační teplotou, kdy teplota tváření je pod hodnotou 30 % teploty tání tvářeného materiálu. Při tváření za studena dochází ke zpevňování materiálu, které se v materiálu zachová i po konci tváření. Dochází k nárůstu odporu proti dalšímu tváření (nakonec dojde k vyčerpání plastičnosti materiálu). Při ohybu vytvářejí deformovaná zrna tzv. tvářecí texturu. Je to zdeformovaná struktura tvářeného materiálu. Textura je orientována směrem k hlavní deformaci. Dochází k anizotropii mechanických vlastností. Zpevněním se zvyšují mechanické hodnoty (mez pevnosti a mez kluzu) a klesá tažnost. Na obrázku číslo 2.1 je znázorněna závislost mechanických vlastností nízkouhlíkové oceli na poměrné deformaci. Z obrázku lze vyčíst, že prudší změny probíhají do hodnoty $\varepsilon = 20\%$ a nad touto hodnotou jsou změny pozvolnější. Mez kluzu roste rychleji než mez pevnosti. Kromě mechanických vlastností se tvářením za studena mění také fyzikální vlastnosti materiálu jako je například elektrická a tepelná vodivost a magnetismus. Plastické vlastnosti se dají zahřátím kovu (žiháním) obnovit a kov získává opět schopnost být plasticky tvářen. Výhodou tváření za studena je vysoká přesnost rozměrů, kvalitní povrch (nenastává okujení) a zlepšování vlastností zpevněním. Nevýhodou je nutnost používat velké tvářecí síly, nerovnoměrné zpevňování a omezená tvárnost materiálu [5],[12].



Obr. 2.2 Závislost mechanických vlastností na poměrné deformaci [12]

2.2 Mechanické jevy při ohýbání

Při ohybu nastává deformace průřezu trubek. Rozměrově větší průřezy jsou více deformovány, než průřezy menší. U silnostěnných trubek dochází k menším deformacím z důvodu odporu materiálu. Při těchto deformacích se na ohybech projevuje prodlužování a smršťování stěn trubky. Na vnější straně trubky působí tahové napětí a na vnitřní straně tlakové napětí viz obrázek číslo 2.2 [3].



Obr. 2.3 Průběh napětí při ohybu trubky [3]

Kolem střední části průřezu ohýbaného materiálu jsou tahová napětí malá a dosahují hodnot nižších, než je mez kluzu daného materiálu. V přechodu mezi těmito dvěma pásmy jsou vlákna bez napětí a bez deformace. Jejich spojnice tvoří tzv. neutrální osu, ve které není napětí a která se při ohýbání ani neprodloží ani nezkrátí. Neutrální osa je na začátku uprostřed průřezu, při ohybu se posouvá směrem k vnitřní straně ohybu. Není tedy totožná s osou těžiště ohýbaného materiálu. Popis napětí je na obrázku číslo 2.3 [3][11].

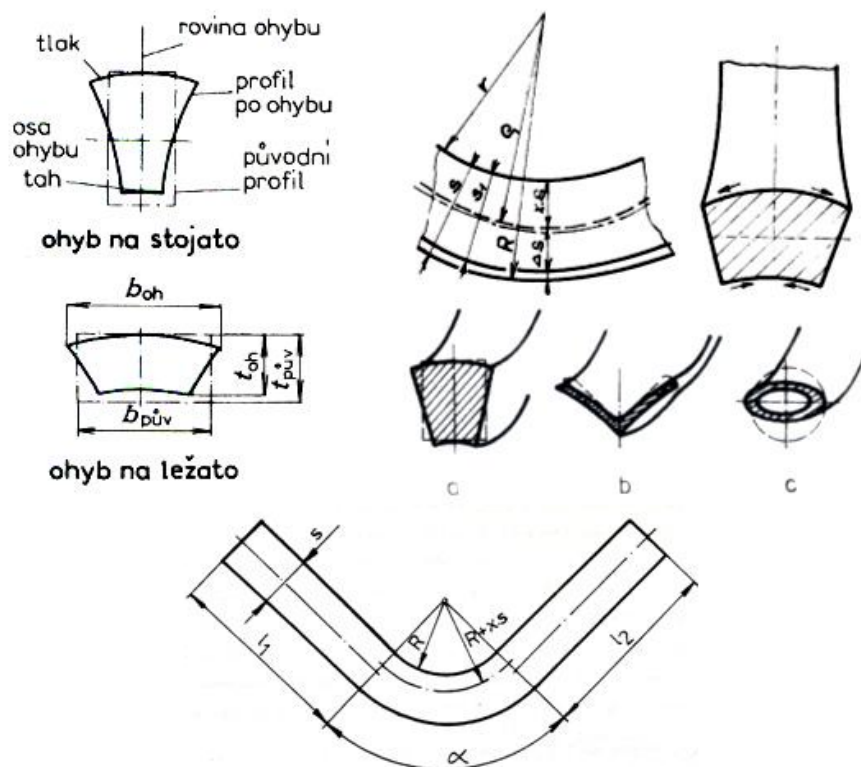
Z délky neutrální osy v ohýbaných částech a z délek rovných úseků se určuje rozvinutá délka polotovaru před ohybem. Vzdálenost x , která charakterizuje polohu neutrální osy, závisí na poměru R/t – viz. tabulka, a poloměr ohybu neutrální osy je potom

$$r = R + x \cdot t$$

kde: t tloušťka materiálu [mm],

R vnitřní poloměr ohybu [mm],

x součinitel posunutí neutrální osy.

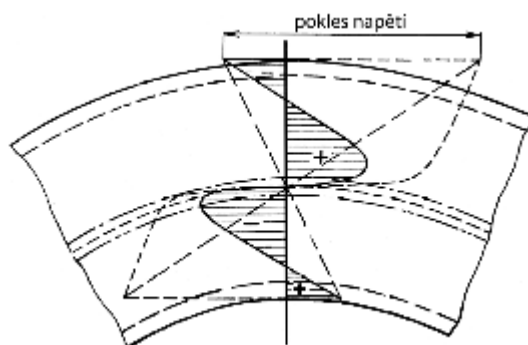


Obr. 2.4 Napětí při ohybu [12]

Tab. 2.1 Charakteristika polohy neutrální osy [11]

R/t	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	1	1,2	1,5	2	3	4	nad 5
x	0,23	0,29	0,32	0,35	0,37	0,38	0,39	0,40	0,41	0,42	0,44	0,45	0,46	0,47	0,50

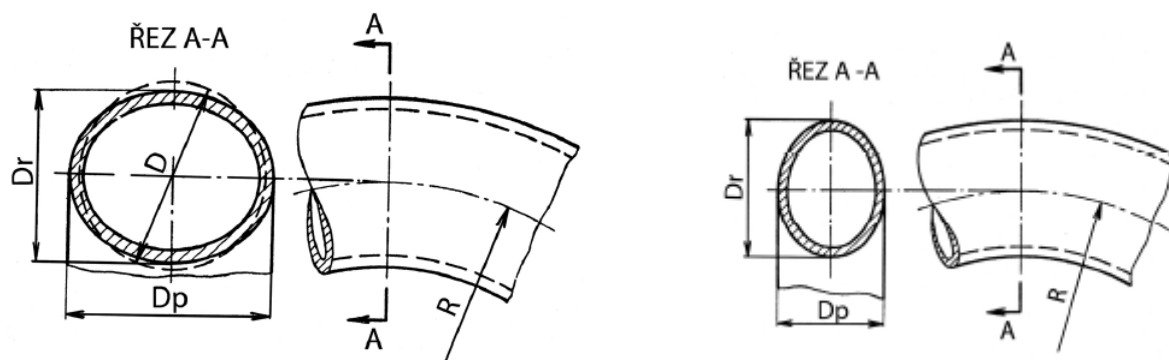
Napětí vznikající při tváření za studena má nelineární průběh. Když ovšem přestaneme na materiál působit ohybovým momentem průběh napětí v deformované trubce se změni na lineární. Tato napětí zůstávající v materiálu tvářeném za studena nazýváme zbytková napětí. Tahové napětí působící při deformaci na vnější straně ohýbané trubky se po odpružení materiálu změni na tlakové napětí. Na obrázku číslo 2.4 je znázorněn průběh zbytkového napětí [3], [12].



Obr. 2.5 Průběh zbytkového napětí [3]

Rozměry trubky se nemění jen v podélné ose materiálu, ale také v příčném směru trubky. Příčný průřez trubky se také mění a získává různé tvary. Nejčastěji se trubka zplošťuje a mění svůj kruhový tvar v oválný, jak je to znázorněno na obrázku číslo 2.5. Velikost ovality lze vyjadřovat v procentech, kterou lze určit pomocí vztahu:

$$o = \frac{D_p - D_r}{D}$$



Obr. 2.6 Ovalita trubky [3]

Dalším možným nechtěným jevem je zvlnění vnitřní stěny trubky. Jedná se o ztrátu stability stěny trubky díky působení tlakového napětí. Zvlnění vzniká u ohybů s větším úhlem ohnutí. V některých případech ohybů trubek není mírné zvlnění vadou. Pro zjištění nežádoucího zvlnění lze vyhodnotit rozteč a výšku vln. Například norma ČSN EN 13 480-4 se zaměřuje na vyhodnocení zvlnění. Musí se splnit dvě následující podmínky [3],[2].

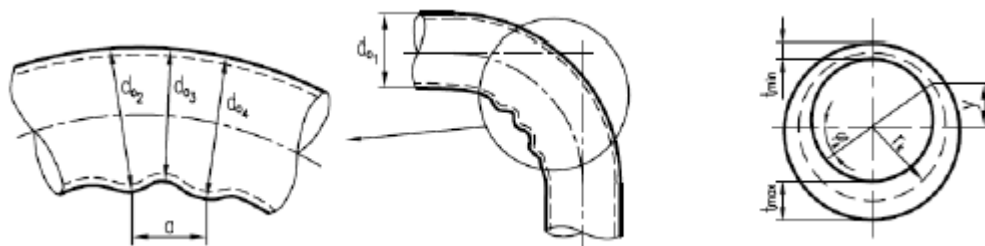
$$h_m \leq 0,03 \cdot d_{01}$$

$$a \leq 12 \cdot h_m$$

kde: h_m - je střední výška sousedních vln $h_m = \frac{d_{02} + d_{04}}{2} - d_{03}$

a - je vzdálenost vln

$d_{01}, d_{02}, d_{03}, d_{04}$ - jsou jednotlivé průměry dle obrázku číslo 2.6.



Obr. 2.7 Zvlnění trubky při ohybu [2]

Dalším nechtěným jevem, který zde uvedu je odpružení materiálu při ohybu. Po skončení ohybu se vlivem pružných deformací ohnutá trubka vrátí. Pominou-li vnější síly na deformované těleso, rozměry tělesa se částečně vrátí do původních, tj. těleso odpruží. Odpružení při ohybu se projevuje jako úhlová odchylka g , jejíž význam roste s délkou ramen. Zpětné odpružení ohýbaných součástí je způsobeno vlivem pružné deformace materiálu kolem neutrální osy. Velikost úhlů odpružení závisí na tvárnosti materiálu, poloměru ohybu a způsobu ohýbání. Bývá v rozsahu 3 až 15°. Odpružení ohybu lze předejít vhodnou konstrukcí nástroje. Nástroj je potřeba zkonstruovat tak, aby umožnil provedení ostřejšího úhlu ohybu, čímž se kompenzuje zpětné odpružení [11],[2].

Velikost odpružení je závislé na modulu pružnosti v tahu, modulu kluzu a geometrických vlastnostech. Určit velikost odpružení se dá také numericky [11].

$$\tan \delta = 0,75 \cdot \frac{l_m}{k \cdot t} \cdot \frac{R_e}{E}$$

$$\delta = \arctan \left(0,75 \cdot \frac{l_m}{k \cdot t} \cdot \frac{R_e}{E} \right)$$

$$k = 1 - x$$

Kde: δ - úhel odpružení $[\circ]$

E - modul pružnosti v tahu $[MPa]$

l_m - vzdálenost ohýbacích hran $[mm]$

k - součinitel

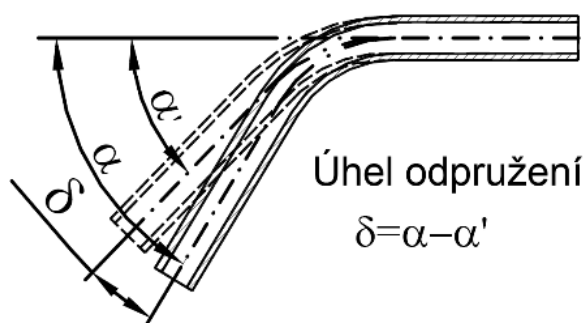
R_e - mez kluzu $[MPa]$

x - koeficient pro stanovení posunutí neutrální vrstvy

Tab. 2.2 Hodnoty koeficientu x pro výpočet součinitele k [11]

R/t	0,1	0,25	0,5	1	2	3	4	5	6	8	10
x	0,32	0,35	0,38	0,42	0,445	0,47	0,475	0,478	0,48	0,483	0,486

Hodnoty koeficientu x pro výpočet součinitele k



Obr. 2.8 Odpružení trubky [11]

2.3 *Analýza tepelně mechanických parametrů ohybu s využitím metody MKP*

MKP je zkratka pro výpočetní metodu konečných prvků používanou k simulaci průběhu napětí a deformací při tváření. Historie vzniku numerické metody MKP sahá do 50. let 20. století na univerzitu v Stuttgartu. Na konci 60. let nechala NASA vyvinout software (nazývaný Nastran) pracující na principu MKP. Software umožňoval provedení velice složitých výpočtů průběhů napětí vzniklých při různých deformacích.

Zjednodušený princip metody MKP používaný při tváření lze popsat takto. Analyzovaná součást je rozdělena na subregiony tzv. prvky nebo elementy. Spojení jednotlivých prvků zajišťuje přesný počet uzlů. Pokud má součást rovinnou plochu jsou jednotlivé prvky trojúhelníkové nebo čtyřúhelníkové. Prostorové součásti se rozkládají na čtyřstěny a kvádry. Každému prvku je přiřazena soustava aproximačních funkcí s konstantními parametry. Aproximační funkce jsou funkcemi kinematicky přípustných polí rychlosti toku jejichž parametry se identifikují jako rychlosti uzlových bodů prvků. Aproximační funkce volíme jednoduché například polynomy s počtem argumentů rovnajícím se počtu uzlů [6],[7],[9].

Koncepce konečných prvků spolu s aproximační funkcí přináší určité výhody oproti jiným numerickým metodám. Procedura řešení nemá žádná geometrická omezení, protože tvářený vzorek je rozdělen na konečný počet elementů. Metody MKP se dají využít pro širokou řadu podmínek týkajících se geometrie vzorku. Vývoj těchto systémů umožnil širší komerční využití. Pro analýzu tvářecích sil ohybu ocelových trubek za studena bude v této práci využit software QForm od ruské společnosti QuantorForm LTD Moskva. Tento software byl zvolen z důvodu možného přístupu k němu na VŠB Ostrava [6],[7],[9].

Provedení analýzy tvářecích sil ohybu ocelových trubek za studena lze zjednodušeně popsat těmito kroky.

- Zjištění chemického složení materiálu a také fyzikálních a mechanických vlastností.
- Vytvoření modelu ohýbané trubky spolu s ohýbacím strojem
- Nastavení programu QForm, zadání potřebných dat pro výpočet MKP
- Analýza výsledků získaných z programu QForm

2.3.1 Data analyzovaného materiálu

Součástí, která byla podrobena analýze tvářecích sil je ocelová bezešvá trubka o průměru 273 x 16 mm. Poloměr ohybu trubky byl určen jako 5 x průměr ohýbané trubky. Trubka je vyrobena z oceli 16CrMo4. Chemické složení a mechanické vlastnosti materiálu jsou uvedeny v tabulkách a grafech uvedených níže .

Tab. 2.3 Materiál trubky

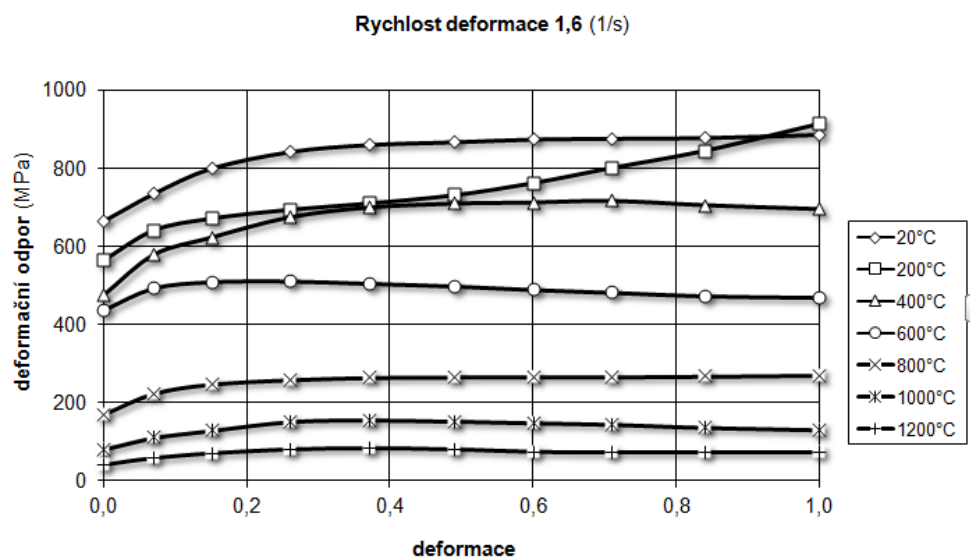
DIN	ČSN	Značka oceli
1.7242		16CrMo4

Tab. 2.4 Chemické složení

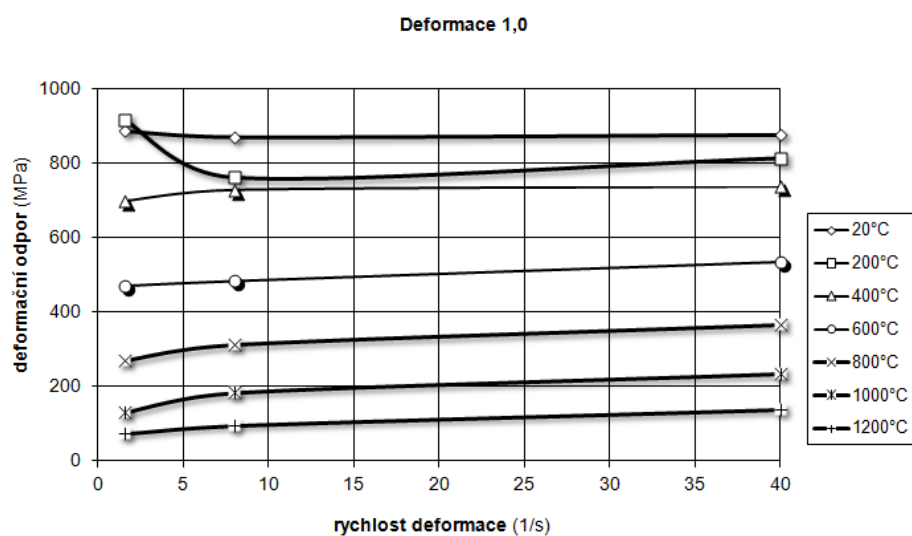
Materiál	%C	%Mn	%Si	%P	%S	%Cr	%Ni	%Mo	%V
16CrMo4	0,12 0,20	0,50 0,80	0,15 0,35	Max.0,040	Max.0,040	-----	-----	0,25 0,35	-----

Tab. 2.5 Mechanické vlastnosti

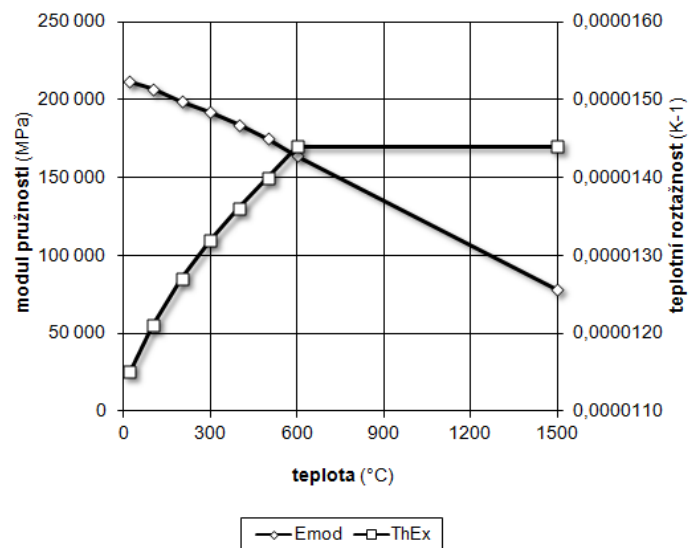
Materiál	Rm	A	Rp
16CrMo4	610 MPa	20%	345 MPa



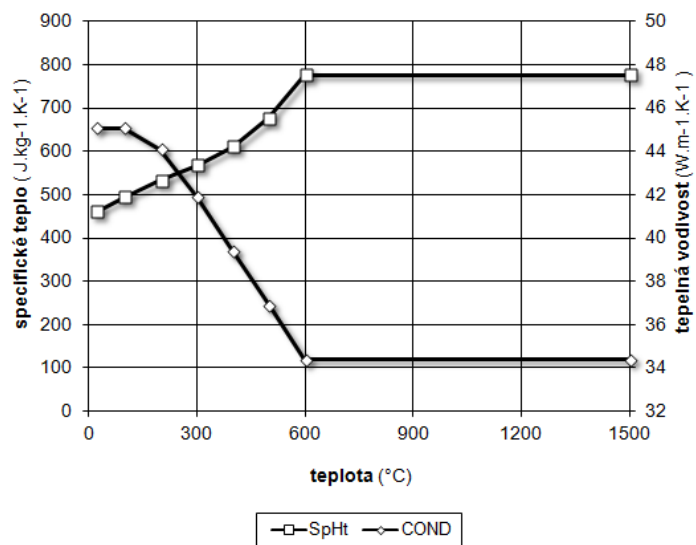
Obr. 2.9 Deformační odpor materiálu 16CrMo4 pro rychlost deformace 1,6 (1/s).



Obr. 2.10 Deformační odpor materiálu 16CrMo4 pro deformaci 1,0.

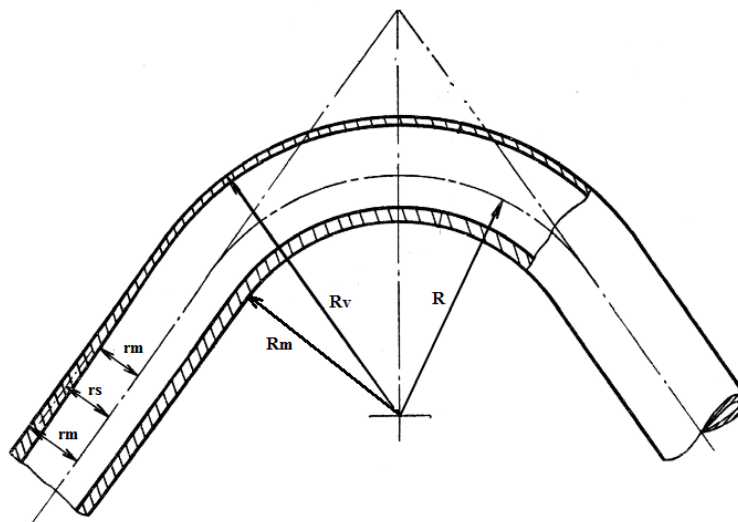


Obr. 2.11 Modul pružnosti a teplotní roztažnosti pro materiál 16CrMo4.



Obr. 2.12 Specifické teplo a tepelná vodivost materiálu 16CrMo4.

Rozměry ohýbané trubky:



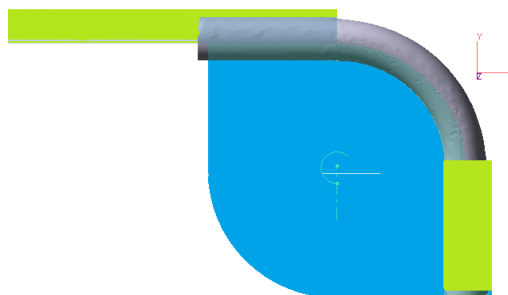
Obr. 2.13 Rozměry ohýbané trubky

R	-	poloměr ohybu trubky 1365 mm (5 x 273 mm)
Rv	-	poloměr ohybu krajních vláken na vnější straně ohybu 1485,5 mm
Rvn	-	poloměr ohybu krajních vláken na vnitřní straně ohybu 1244,5 mm
rm	-	vnitřní poloměr trubky 120,5 mm
rs	-	střední poloměr trubky 128,5 mm
rv	-	vnější poloměr trubky 136,5 mm
s	-	tloušťka stěny trubky 16 mm

2.3.2 Model ohýbané trubky

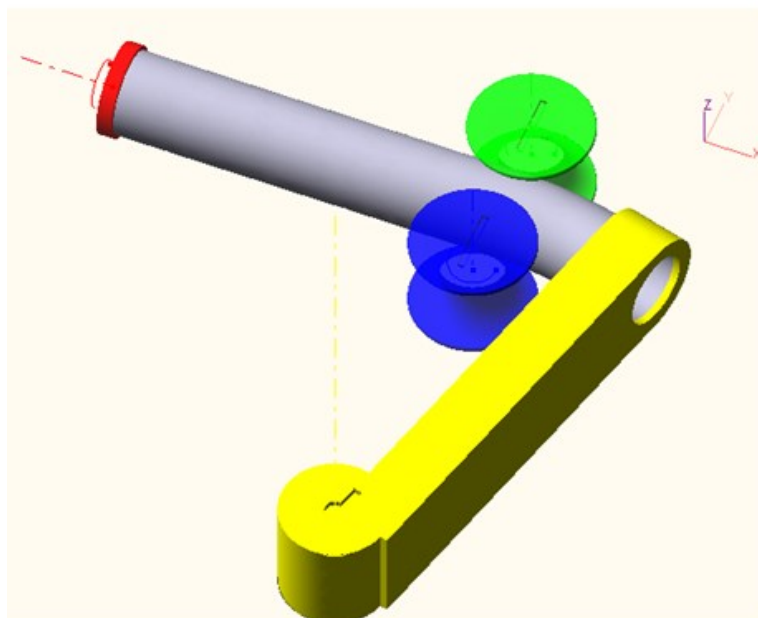
Model potřebný k provedení numerické metody MKP byl vytvořen v konstrukčním programu Auto CAD Inventor Professional 10. Tento program je jedním z mnoha aplikací CAD pro strojírenskou konstrukci, který je poskytován společností Autodesk. V Inventoru byly sestaveny jednotlivé díly a poté byly vloženy do jednotné sestavy. Zjednodušený model ohybu trubky znázorňuje metodu ohýbání trubek pomocí tlačné síly, vodících kladek a ohybové páky. Páka je zvolená pro ohyb trubky úmyslně. Běžné metody ohýbání trubek využívají k tváření trubky otočné nebo pevné kladky viz.

obrázek číslo 2.14. Kladky jsou vyrobeny přesně podle rozměrů ohýbané trubky. Nevýhoda z toho plynoucí je zřejmá. Pro ohyb různě velkých poloměrů je nutné více druhů ohybových kladek.



Obr. 2.14 Model ohybu trubky s navijecí kladkou

Ohyb pomocí páky by měl tuto nevýhodu minimalizovat. Páku lze zkonstruovat nastavitelnou. Při tvorbě modelu je důležité zachovat skutečné rozměry ohýbačky a trubky. Vytvořený model byl uložen ve formátu STEP (Standard for Exchange of Production). Tento formát umožňuje přenášet data mezi jednotlivými softwarovými aplikacemi. Sestava s nakresleným modelem je vyobrazena na obrázku číslo 2.15.

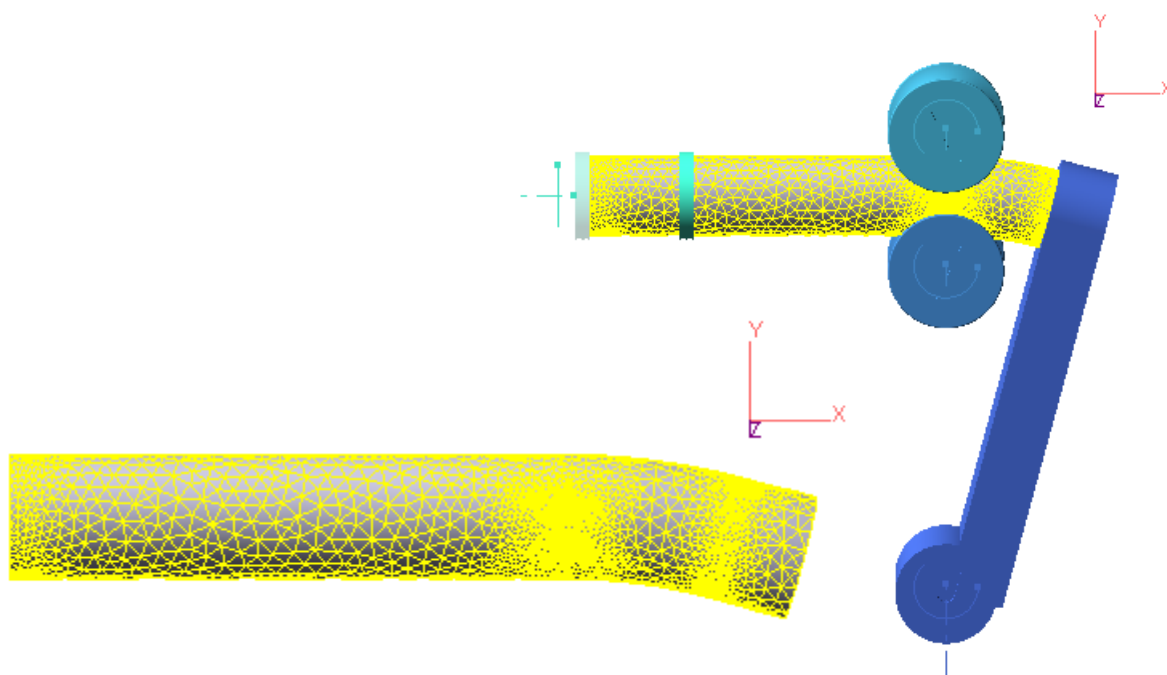


Obr. 2.15 Model ohybu trubky za pomoci ohybové páky

2.3.3 Spuštění numerické simulace QForm

Uložený model vytvořený v aplikaci AutoCAD Inventor Professional 10 přeneseme do softwaru QForm. Data jsou uložena ve formátu s koncovkou STEP. Model poskytuje cenná data o geometrii analyzované součásti. Geometrická data modelu dosazujeme do QFormu jako vstupní data. Jedná se o rozložení a názvy klíčových elementů analýzy. V simulaci trubky mezi vodícími kladkami a pákou ohybu je počítáno i s odpružením ohýbané trubky. Vstupních dat vkládaných do QFormu je mnoho. Mezi jinými jsou to také například data o tření mezi trubkou a vodícími kladkami, rychlost tlačného zařízení, teplota tváření a další.

Samozřejmostí bylo také vložení vstupních dat o materiálu ohýbané trubky, vodících kladek a také ohybové páky. Po kompletním zadání všech vstupních dat a okrajových podmínek byla numerická simulace spuštěna. Software QForm rozdělí součást na jednotlivé prvky a tzv. zasítuje trubku. Vytvořená síť na ohýbané trubce je znázorněna na obrázku číslo 2.16. Trubka byla pro zrychlení výpočtu předem ohnuta o 15° . Hustota jednotlivých mřížek určuje do jisté míry čas výpočtu simulace.

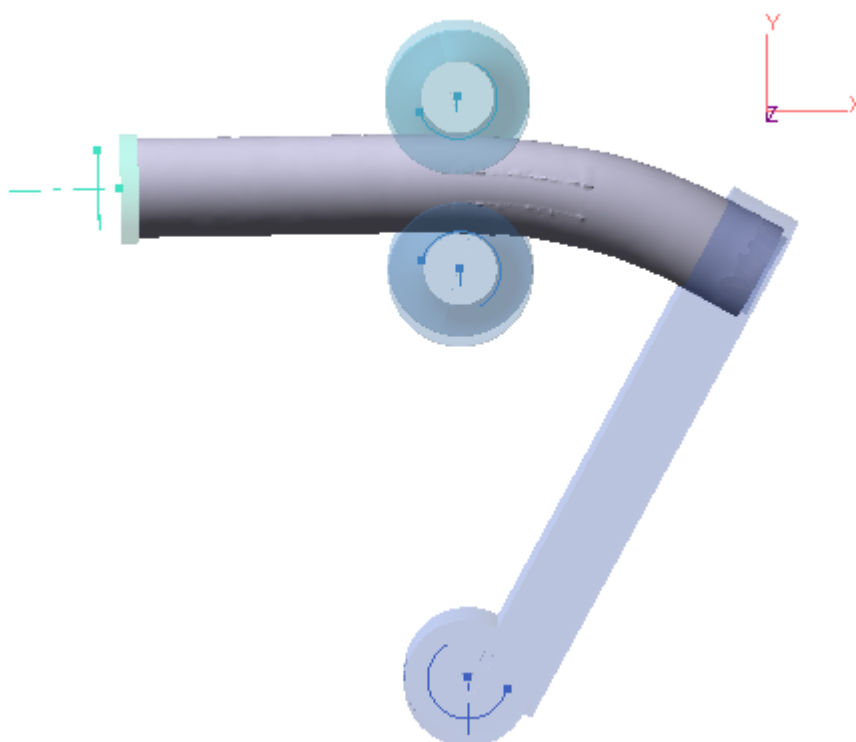


Obr. 2.16 Zasítování modelu

2.3.4 Analýza výsledků z QFormu

Software provedl na základě zadaných vstupních dat několik výpočtů na bázi konečných prvků. Analýza byla provedena v režimu tváření za studena. Díky QFormu jsme dostali soustavu obrázků s vyznačenými informacemi o teplotě, napětí a o rozměrech průřezu trubky. Numerické výsledky byly převedeny do grafické podoby. Z grafů si lze dobře udělat představu o namáhání materiálu a průběhu vnitřních napětí při tváření.

Tvar oblouku ohýbané trubky má pravidelný tvar a nemá žádné viditelné zvlnění na spodní straně ohybu. Z obrázku číslo 2.17 a 2.18 je viditelná malá deformace trubky v místech kontaktu vodících kladek.

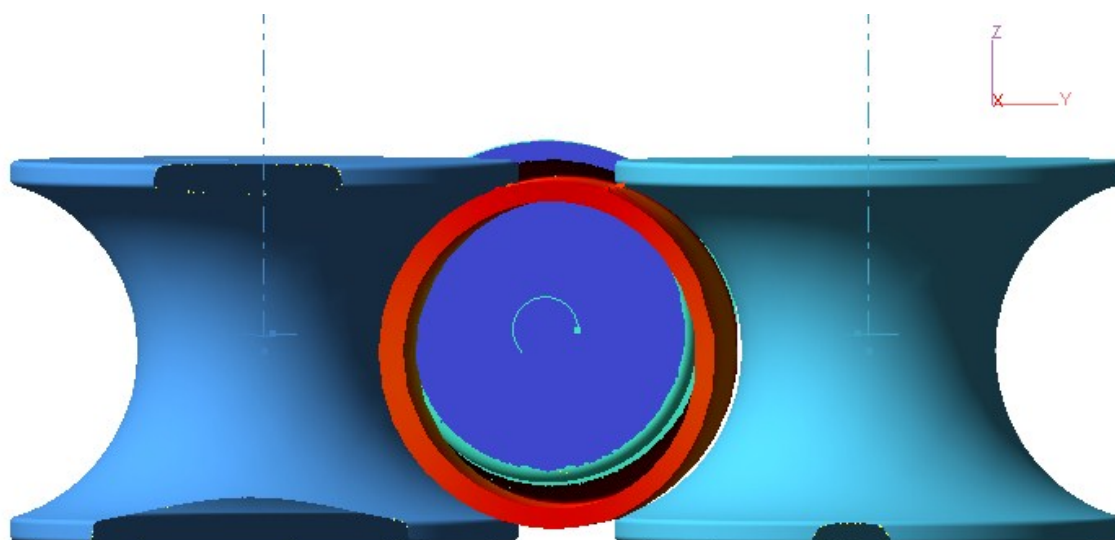


Obr. 2.17 Deformace trubky od vodících kladek ohýbačky.



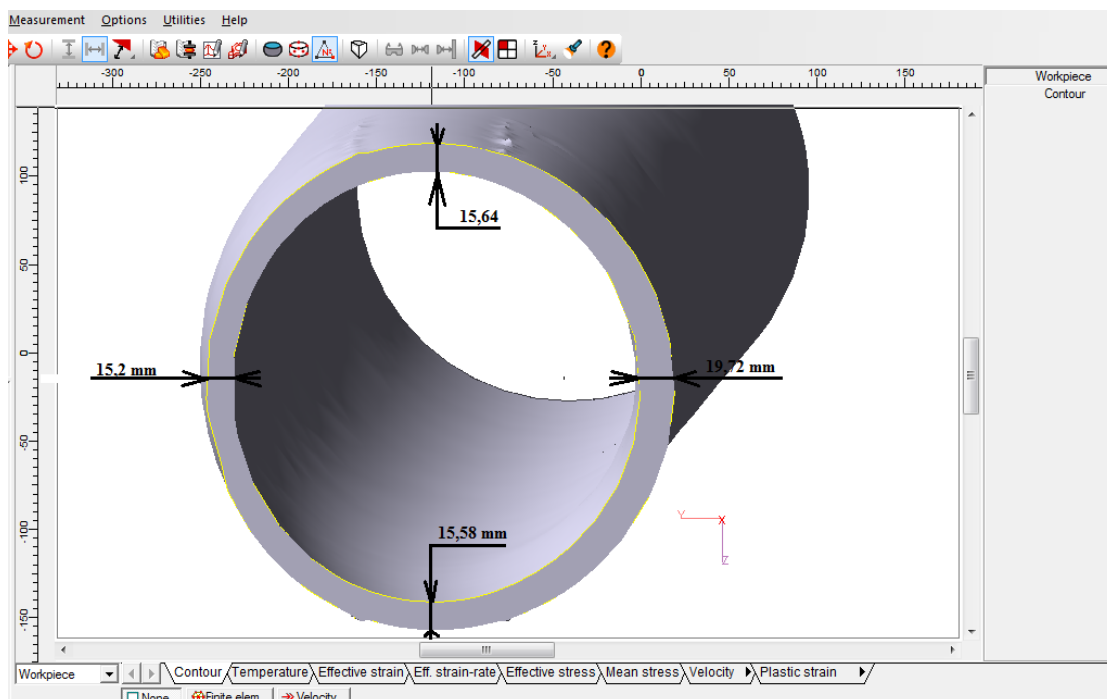
Obr. 2.18 Deformace trubky způsobená vodícími kladkami

Dostatečně silná stěna trubky a malý úhel ohybu zaručily, že na spodní straně trubky se nevytvořilo zvlnění. Další změnou geometrických tvarů ohnuté trubky je ovalita průřezu ohnuté trubky. Na obrázku je znázorněn řez trubkou v místě ohybu mezi vodícími kladkami. Z obrázku číslo 2.19 téměř nelze rozpoznat změnu průřezu trubky.



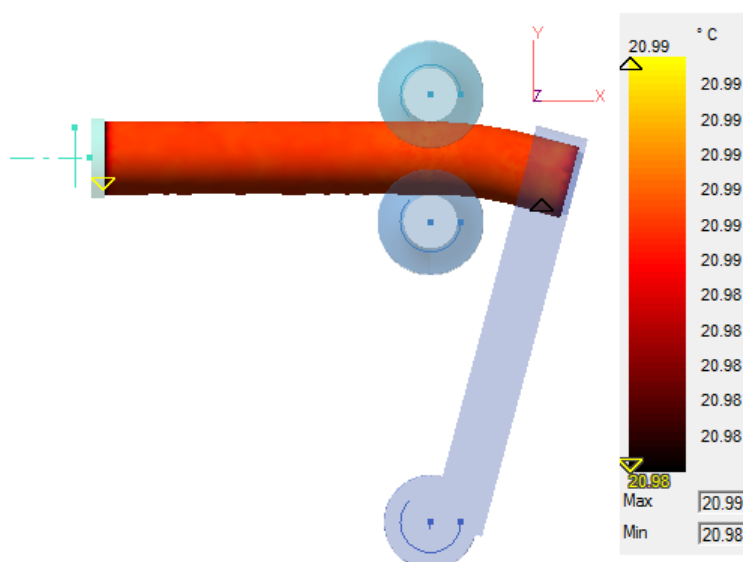
Obr. 2.19 Řez trubkou v místě ohybu

Pro určení změny ovality byl průřez trubky měřen na provedeném řezu viz. obrázek číslo 2.20. Z naměřených rozměrů vyplývá malá změna tloušťky stěn trubky. V místech kde působí tahové napětí je stěna tenčí a ve spodní části trubky je stěna silnější.

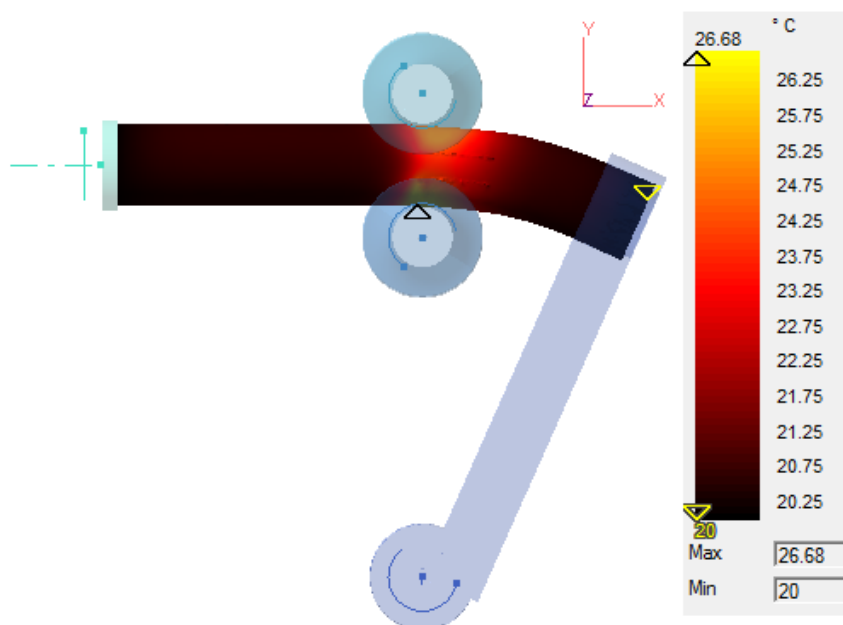


Obr. 2.20 Příčný řez ohnutou trubicí

Dalšími obrazovými výstupy získanými z analýzy ohybu trubky jsou obrazy veličin a jejich rozložení v průběhu tváření. Jedná se především o efektivní deformaci, střední napětí a deformační odpor. Software QForm také umožňuje zobrazení průběhu teploty při tváření. Protože zadaná trubka byla ohýbána za studena není průběh teplot zásadní informací. Jednotlivé obrázky jsou uvedeny níže.



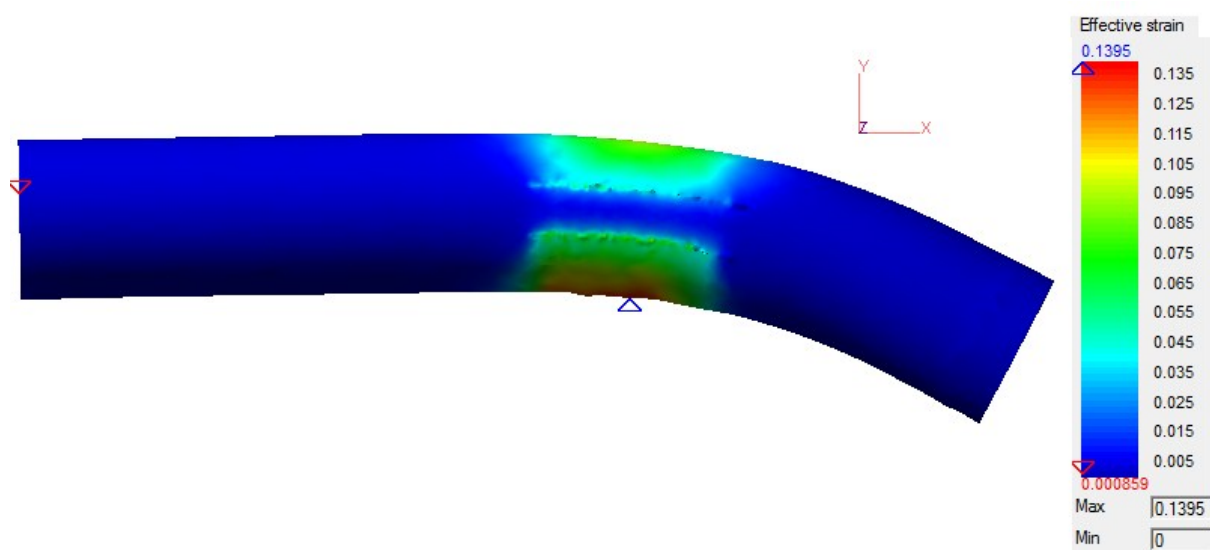
Obr. 2.21 Teplota materiálu trubky před tvářením (16CrMo4)



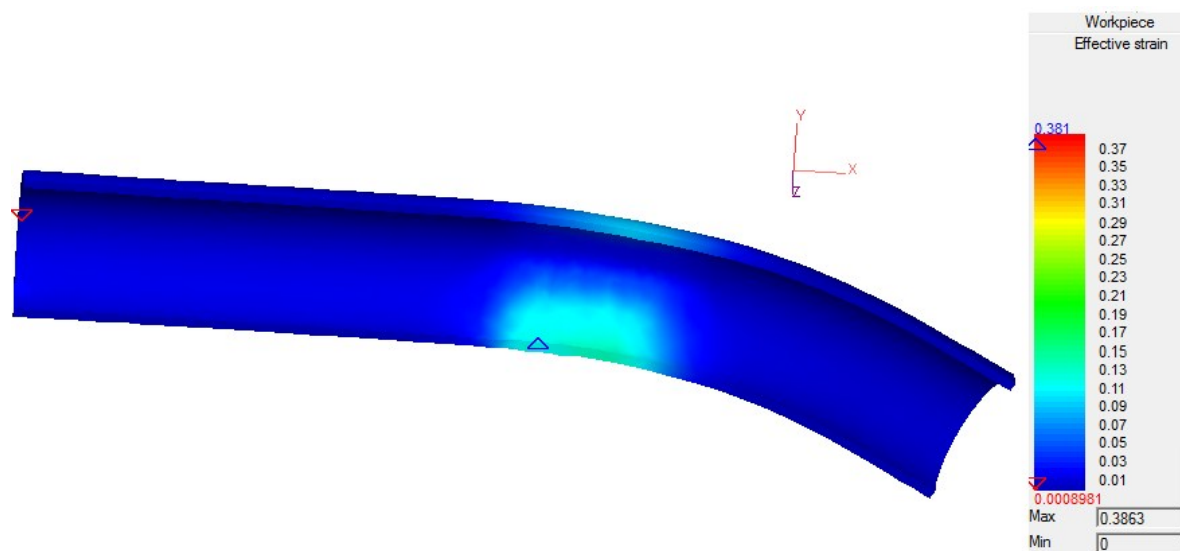
Obr. 2.22 Teplota materiálu trubky při tváření (16CrMo4)

Teplota na začátku tváření dosahuje 20,99°C a v průběhu tváření se zvýší na cca. 26,68°C.

Deformační napětí jehož průběh je znázorněn na dalším snímku 2.23. Největší napětí je v místech kontaktu ohýbané trubky s vodícími kladkami. Dosahuje hodnot 0,1395 a jeho průběh je především v krajních vláknech trubky. Deformační napětí způsobuje tvarovou deformaci na povrchu trubky.

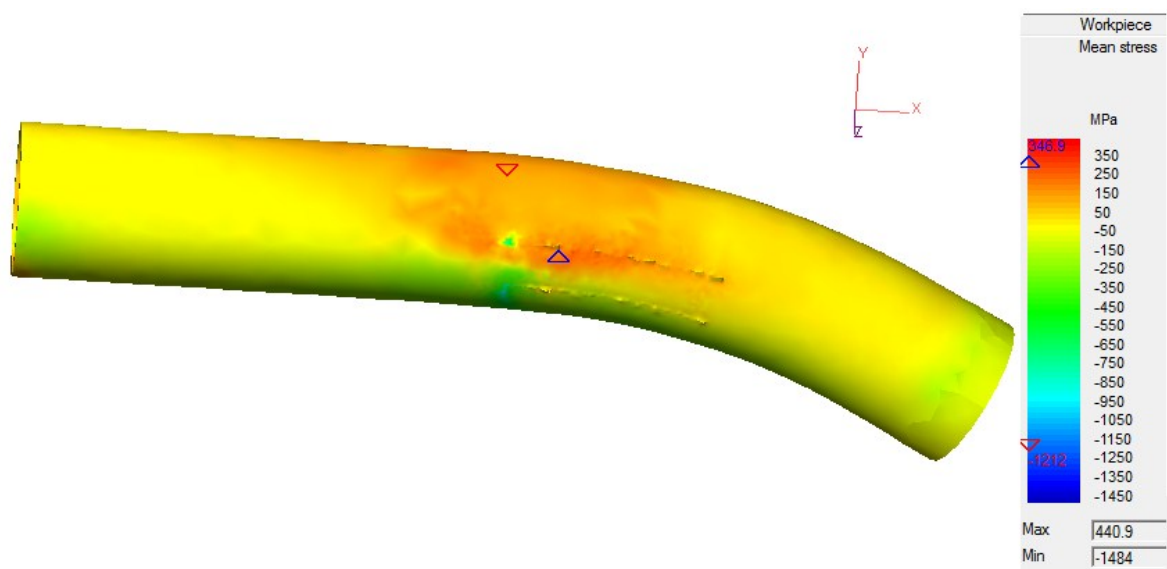


Obr. 2.23 Průběh deformačního napětí na povrchu ohýbané trubky (16CrMo4)

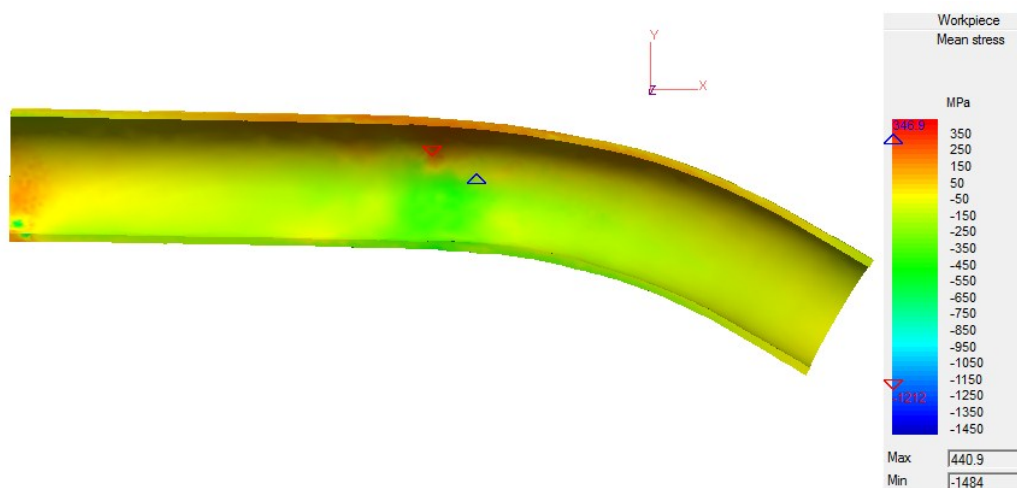


Obr. 2.24 Průběh deformačního napětí na vnitřní stěně ohýbané trubky (16CrMo4)

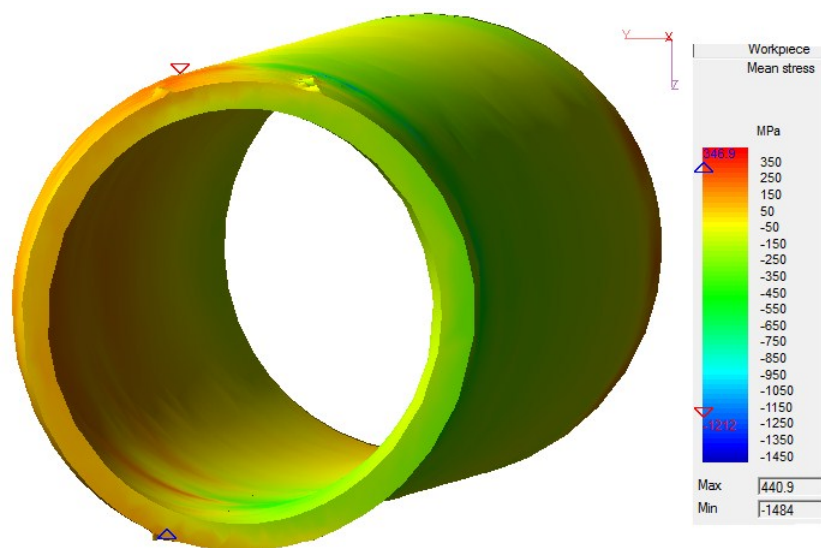
Střední napětí je znázorněno na obrázku 2.25 a 2.26. Při ohybu trubky dochází na vnějších krajních vláknech k tahovému napětí a na vnitřní straně krajních vláken k tlakovému napětí. Ve střední části trubky kolem neutrální osy napětí klesá. Na animaci je tahové napětí znázorněno žlutou barvou a tlakové napětí zelenou barvou.



Obr. 2.25 Střední napětí na povrchu ohýbané trubky (16CrMo4)

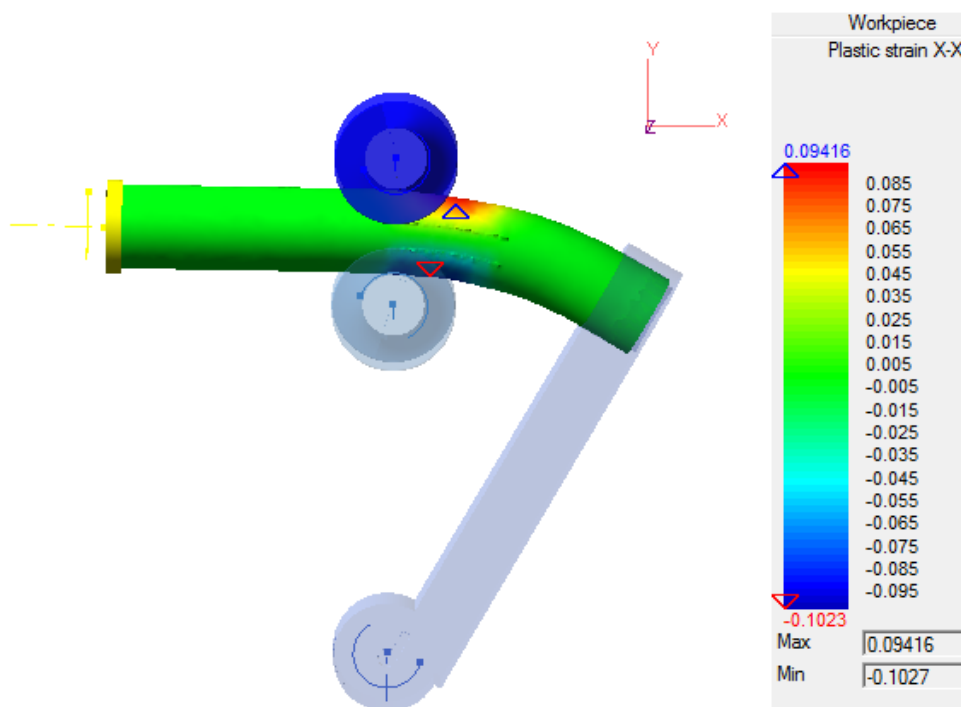


Obr. 2.26 Střední napětí na vnitřní stěně ohýbané trubky v podélném řezu (16CrMo4)

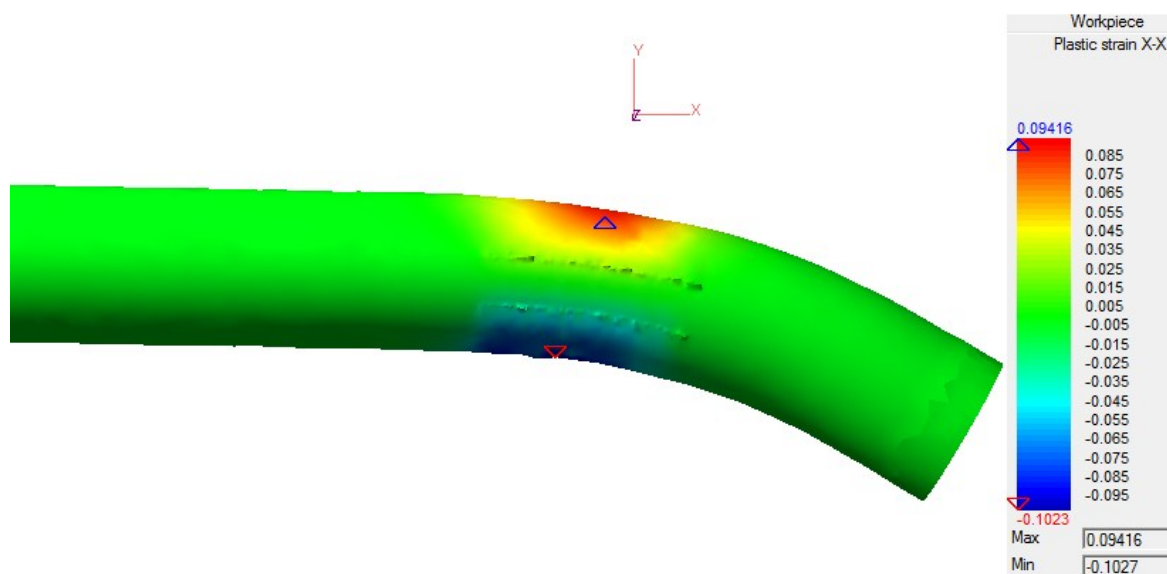


Obr. 2.27 Animace středního napětí v příčném řezu v místě ohybu trubky (16CrMo4)

Na dalších obrázcích 2.28 a 2.29 je vyobrazen průběh plastické deformace v ose x.



Obr. 2.28 Plastická deformace ohýbané trubky (16CrMo4)

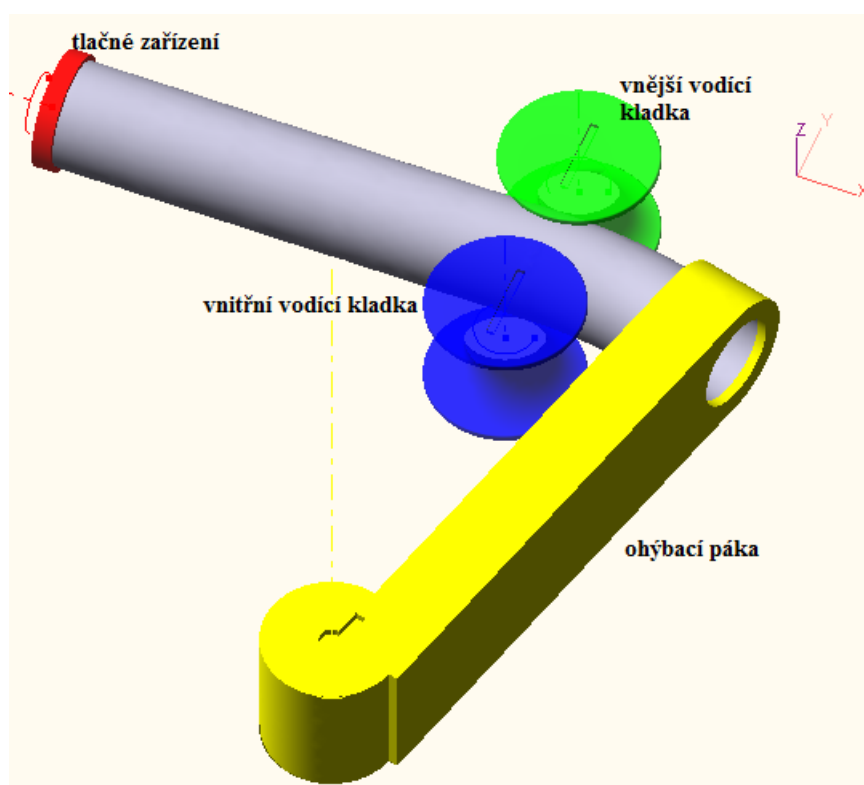


Obr. 2.29 Plastická deformace ohýbané trubky v ose X (16CrMo4)

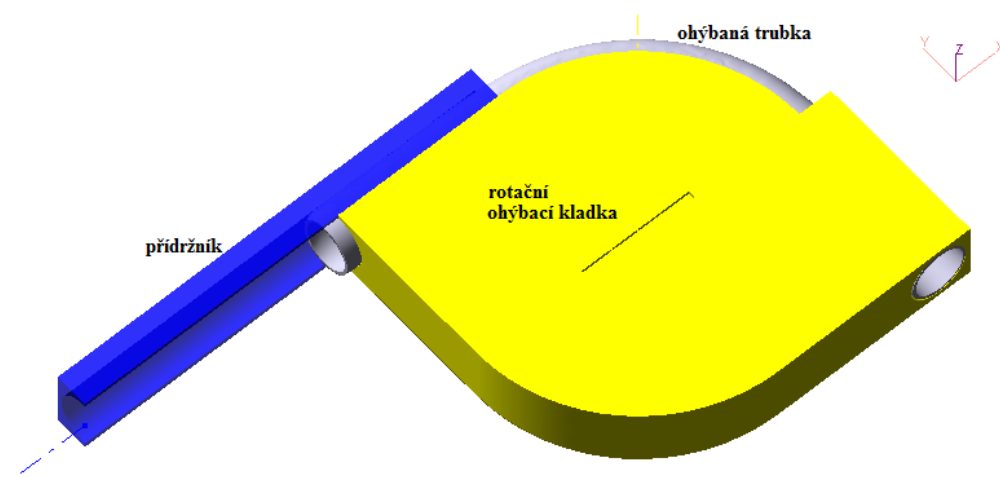
Výsledná data z analýzy umožňují vytvořit velké množství nejrůznějších obrazů na průběhy napětí, teploty, deformací a jiné procesy probíhající v průběhu tváření. Záleží jen na tom jaká data budou znázorněna.

3 Stanovení základních vektorů sil působících v ohybovém zařízení

Součástí výstupových dat z MKP analýzy jsou informace o silových reakcích na jednotlivé části ohýbacího stroje. Určení velikostí těchto sil má významný vliv na konstrukci ohýbacího nástroje. Velikost sil má vliv na tuhost stroje, která ovlivňuje průběh ohybu. Směr a velikost působení silových reakcí je na každé součásti stroje jiný. Pro porovnání průběhu sil v nástroji nebyl vytvořen jen model ohybu trubky za pomoci páky, ale také druhý model ohybu trubky za pomoci rotační matrice. Jednotlivé části ohýbacích strojů byli vybarveny. Tyto barvy byly použity při tvorbě grafů znázorňujících velikosti sil a ohybové momenty. Oba modely jsou na obrázku číslo 3.1. a 3.2.

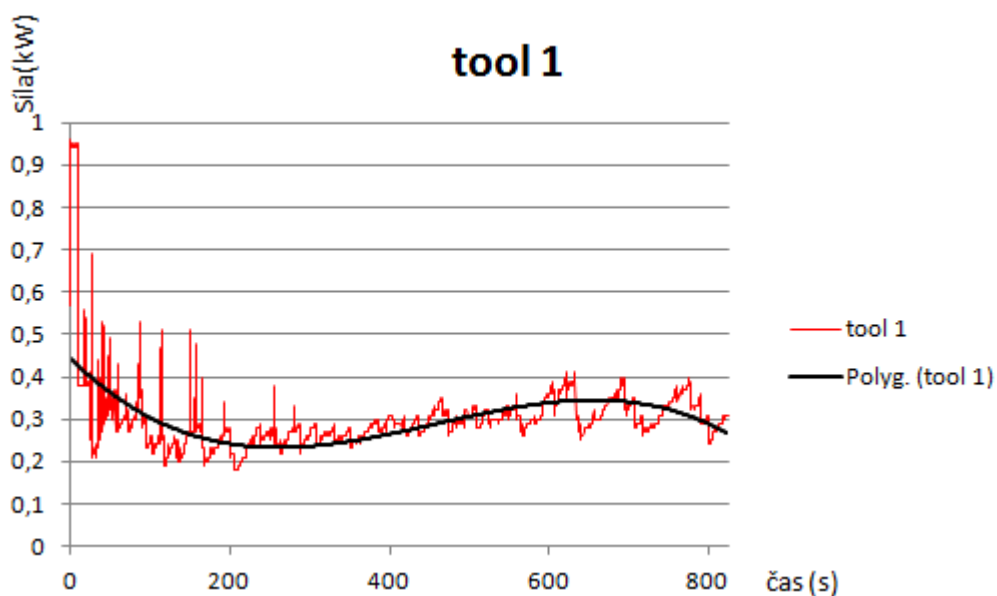


Obr. 3.1 Model ohybu pomocí páky



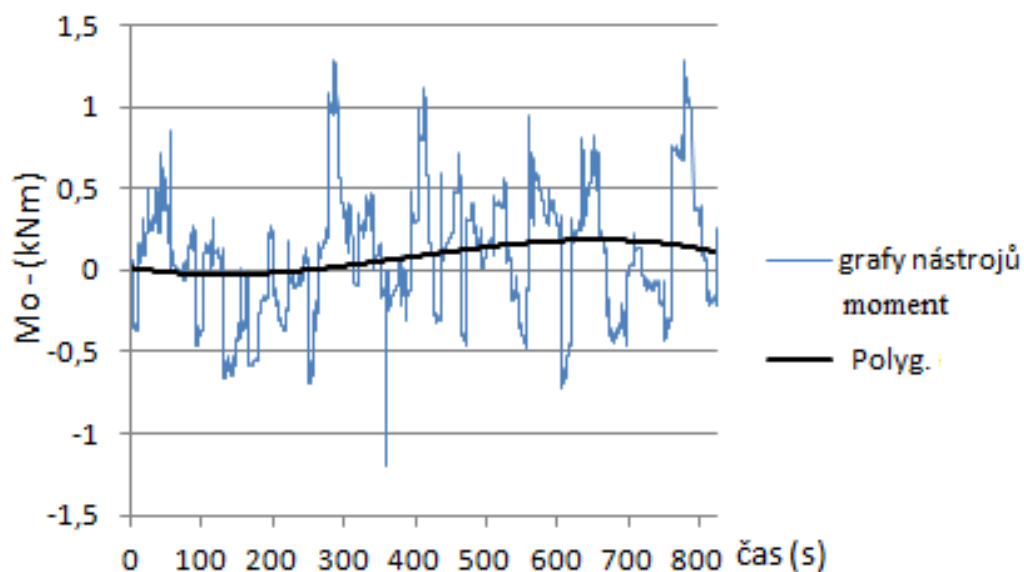
Obr. 3.2 Model ohybu pomocí rotační kladky

Na sílu, která tlačí přes tlačné zařízení na ohýbanou trubku působí reakce v opačném směru vyvolaná od ohýbané trubky. Tlačná síla nemá ryze plynulý průběh, ale vzniká tam malé rozptýlení z důvodu odporu deformované (tvářené) trubky. Zatížení tlačného zařízení je znázorněno na obrázku 3.3.



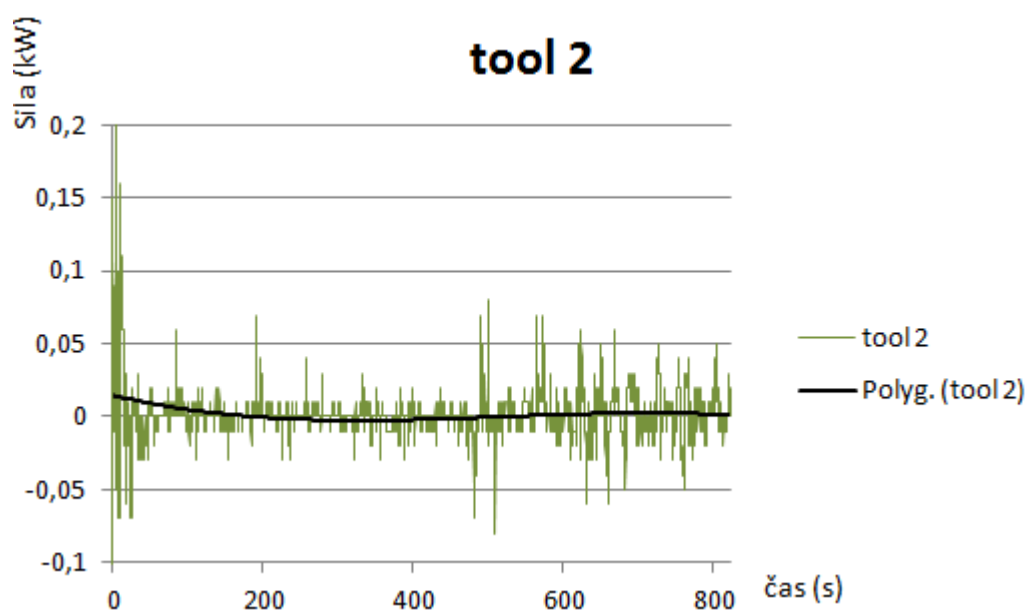
Obr. 3.3 Tlačné zařízení ohýbacího zařízení s pákou

Při ohybu trubky pomocí páky je na vnitřní vodící kladku vyvozován ohybový moment. Kladka je namáhána při kontaktu s ohýbanou trubkou. Vnitřní vodící kladka je namáhána ohybovým momentem více než horní vodící kladka. Rozsah momentu působících na vnitřní kladku je znázorněna na obr. 3.4.



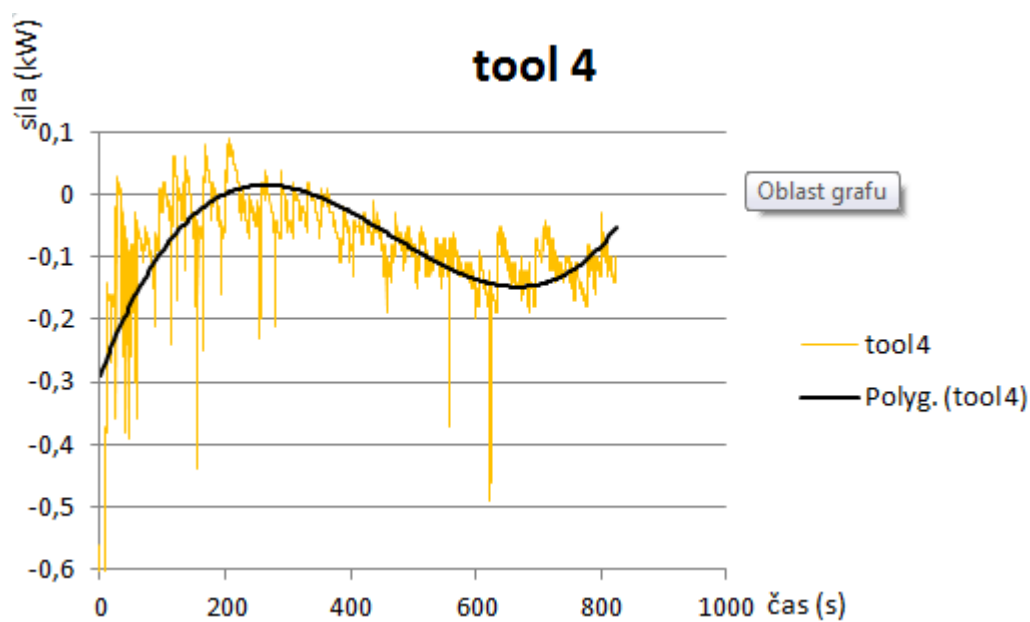
Obr. 3.4 Ohybový moment působící na vnitřní kladku při ohybu pákou

Síly působící na vnější vodící kladku jsou znázorněny na obrázku 3.5.

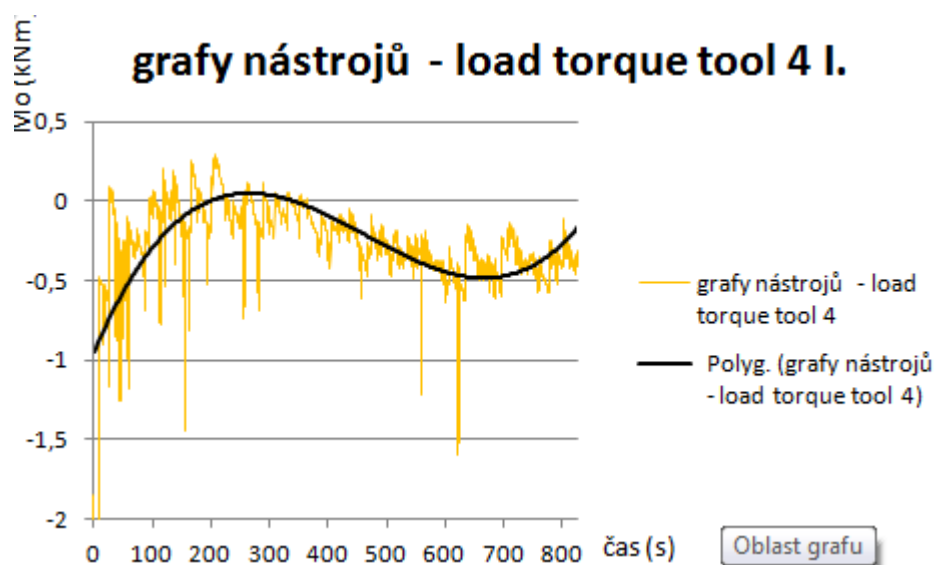


Obr. 3.5 Síla působící na vnější vodící kladku při ohybu pákou

Největší působení sil a ohybového momentu je na páku ohýbacího stroje. V místě kontaktu ohýbané trubky s pákou klade ohýbaný materiál největší odpor proti ohybu. Silové poměry jsou znázorněny na obrázku 3.6 a 3.7.

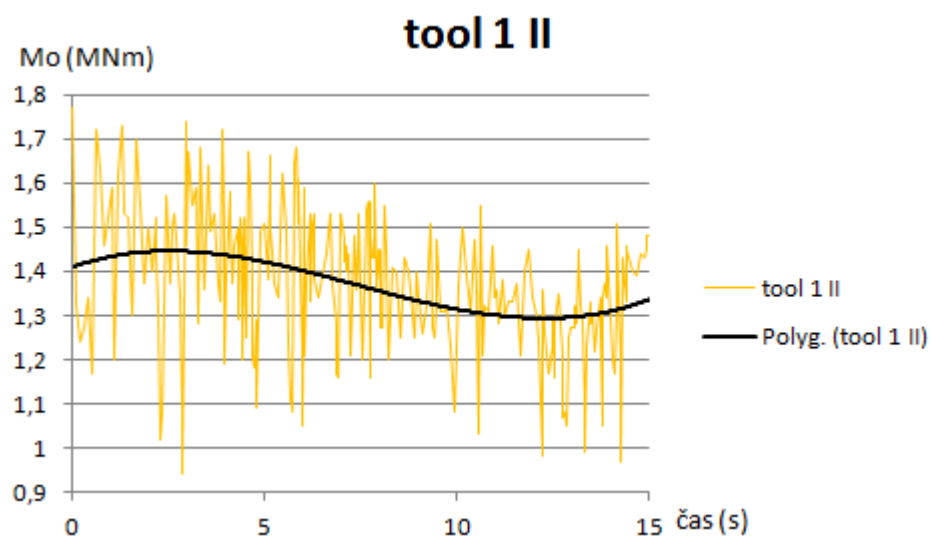


Obr. 3.6 Síla působící na páku při ohybu

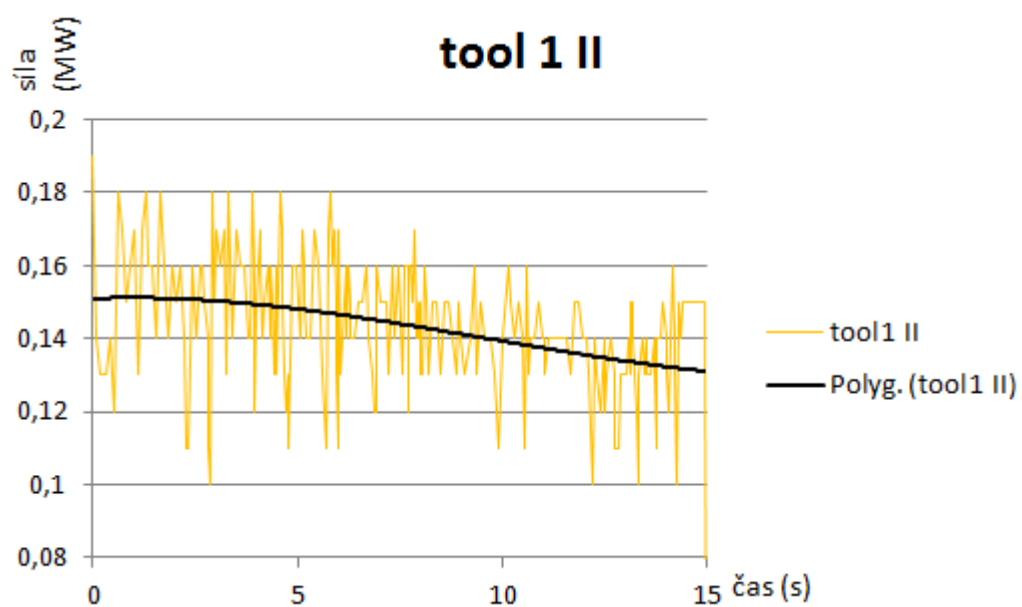


Obr. 3.7 Ohybový moment působící na páku při ohybu trubky

Pro srovnání hodnot v grafech byly vytvořeny dva grafy z ohýbacího zařízení, které využívá k ohybu otočnou ohýbací kladku. Průběh sil a ohybový moment nástrojem je znázorněn na obrázku 3.8 a 3.9. Srovnání grafů je jen orientační, poloměry ohybu trubek jsou odlišné.



Obr. 3.8 Působení ohybového momentu na otočnou matici při ohybu



Obr. 3.9 Síla působící na otočnou matici při ohybu

4 Analýza pro materiálové reprezentanty různých legovacích konceptů

Numerická analýza MKP byla využita také k porovnání průběhu sil dvou různých materiálů určených k výrobě trubek. Jedná se o materiál CK35 (1.0501) a již zobrazovaný materiál 16CrMo4 (1.7242). Základní vlastnosti těchto dvou ocelí jsou uvedeny v tabulkách níže.

Tab. 4.1 Materiál trubky, chemické složení, mechanické vlastnosti

DIN	ČSN	Značka oceli
1.0501		CK35
1.7242		16CrMo4

Chemické složení

Materiál	%C	%Mn	%Si	%P	%S	%Cr	%Ni	%Cu
CK35	0,32 0,40	0,50 0,80	0,15 0,40	Max.0,040	Max.0,040	Max.0,25	Max.0,3	0,25 0,35

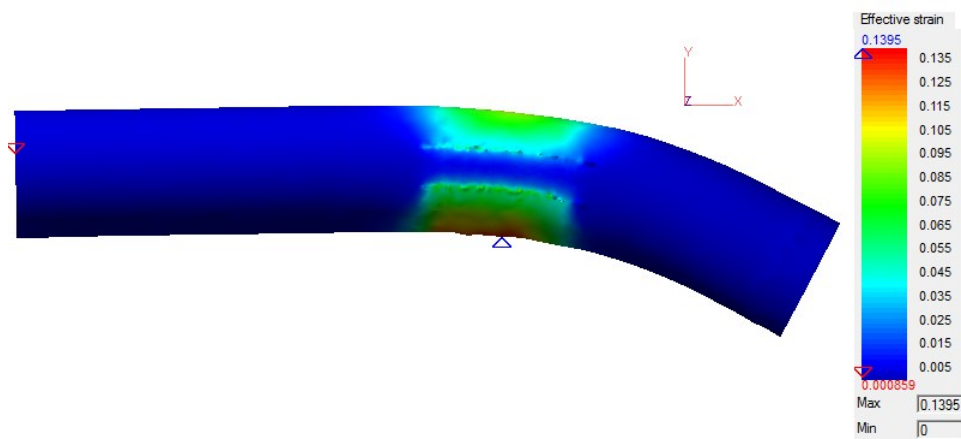
Chemické složení

Materiál	%C	%Mn	%Si	%P	%S	%Cr	%Ni	%Mo	%V
15020 (16CrMo4)	0,12 0,20	0,50 0,80	0,15 0,35	Max.0,040	Max.0,040	-----	-----	0,25 0,35	-----

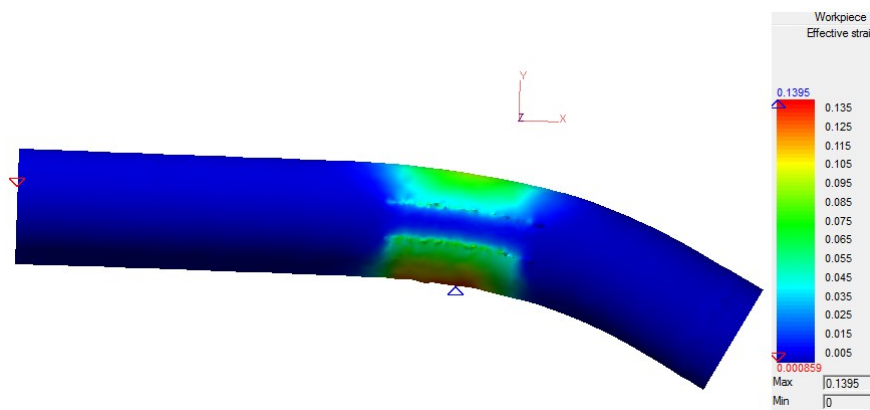
Mechanické vlastnosti

Materiál	Rm	A	Rp
C35	490 MPa	20%	290 MPa
16CrMo4	610 MPa	20%	345 MPa

Porovnání výsledků analýzy pro dva rozdílné materiály je poměrně jednoduché a rychlé. Nejsložitější částí analýzy je příprava, která byla popsána v kapitole 2. Animace získané z analýzy byly vzájemně posuzovány.

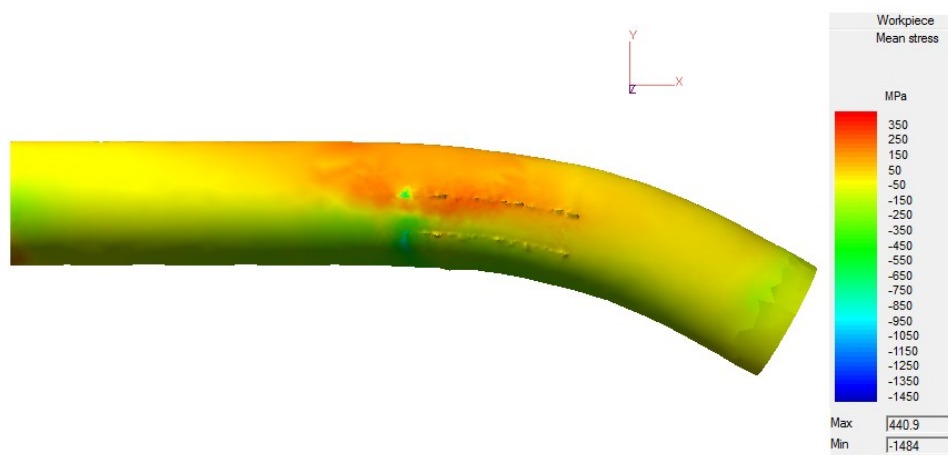


16CrMo4

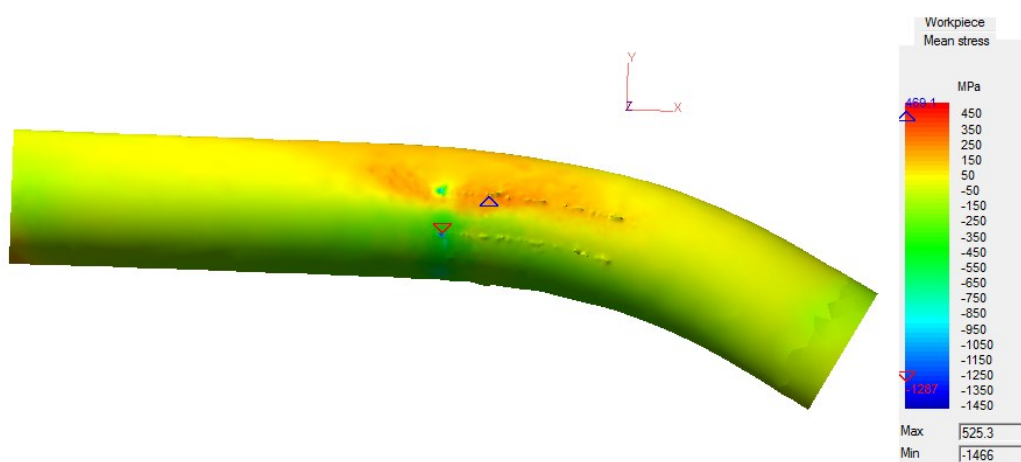


C35

Obr. 4.1 Průběh deformačního napětí na povrchu trubek porovnávaných materiálů

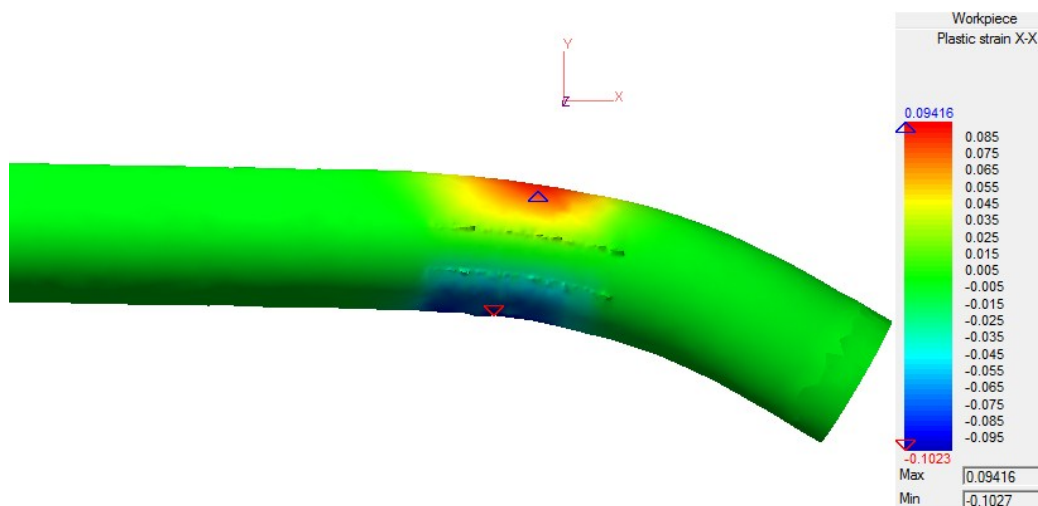


16CrMo4

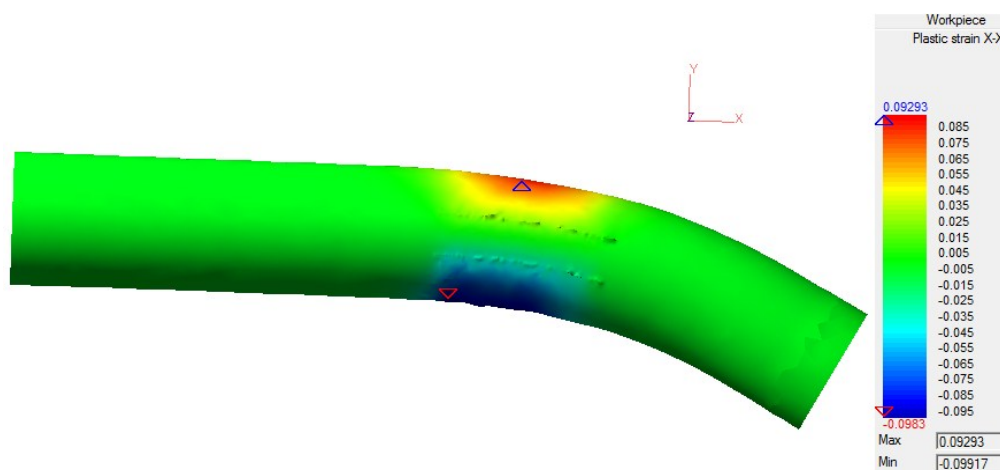


C35

Obr. 4.2 Animace středního napětí analyzovaných materiálů



16CrMo4



C35

Obr. 4.3 Plastická deformace ohýbané trubky v ose X

Při posuzování obou materiálů je jednoznačně prokazatelný stejný průběh plastické deformace. Průběh deformace je největší v krajních polohách ohýbané trubky. Napětí je v místech neutrální osy téměř nulové. Rozdíl v velikosti středního napětí dosahuje jen minimálních rozdílů. Z výsledků získaných softwarem QForm jsou hodnoty středního napětí pro ocel C35 - max. 525,3 MPa a pro ocel 16CrMo4 - 440,9 MPa. Při porovnávání výsledků bylo zjištěno stejné poškození ohýbané trubky v místech kontaktu trubky s vodíci kladkami. Velikost a průběh plastické deformace u analyzovaných materiálů je velice podobný. Získané hodnoty se jen nepatrně liší. Získané výsledné hodnoty poskytují široké možnosti porovnávání materiálů. Numerické simulace výrazně zrychlí rozhodování

fírem o volbě vhodného materiálu pro své výrobky.

5 Diskuze dosažených výsledků

Cíl této diplomové práce vychází ze samotného zadání. Analýza tvářecích sil ohybu ocelových trubek za studena. Diplomová práce byla rozdělena do několika kapitol. V první kapitole byly popsány jednotlivé způsoby ohybu trubkových profilů. Byli popsány metody ohybů pro tenkostěnné i silnostěnné trubky a také pro velké a malé průměry.

Ve druhé kapitole byly zmíněny informace o numerické metodě MKP a softwaru QForm, pomocí kterého byla analýza vytvořena. Byl popsán i zjednodušený postup výpočtu analýzy. Vypočtená výsledná data byla zpracována v jednotlivé obrázky. Na obrázcích jsou vyobrazeny průběhy napětí a deformací při ohybu trubky.

Ve třetí kapitole byly vypracovány grafy s vypočtenými hodnotami sil a ohybových momentů. Každá síla působící na jednotlivé části ohýbacího zařízení byla zakreslena do grafů. Při bližším prozkoumání bylo zjištěno, že při ohybu trubky o průměru 273 x 16 mm (16CrMo4) pomocí ohýbací páky působí na páku velmi malé síly a ohybové momenty. Projevilo se, že největší zatížení stroje musí snést vodící kladka a také ohýbací páka.

Čtvrtá kapitola byla věnována analýze dvou různých materiálů. Výsledky analýzy prokázaly drobné rozdíly v určených materiálech. K podrobné analýze by byl zapotřebí mnohem detailnější rozbor výsledků. O získaných výsledcích by se dala napsat celá diplomová práce.

Výsledky získané pomocí MKP jsou výsledky teoretické a v praxi se může projevit chyba, kterou tato analýza neodhalila. Tváření materiálů je velice složitý proces a zaručit stoprocentní jistotu přesnosti analýzy nelze. Přesné provedení a nastavení stroje pro ohyb zatím neustále vyžaduje určitou praxi a zkušenosti obsluhujícího personálu.

6 Závěr

Výsledkem diplomové práce bylo určení tvářecích sil působících na ohýbací zařízení. Tento cíl byl splněn. Systém ohybu trubek pomocí ohýbací páky lze doporučit pro ohýbání trubek.

7 Použitá literatura a zdroje

- [1] TYLŠAR, S. *Limity ohybu ocelových trubek za tepla*, Diplomová práce, VŠB-TU Ostrava, Katedra mechanické technologie, r. 2009, 53 s.
- [2] FIŠAR, L. *Kriteria vzniku defektů při ohybu profilových trubek*, Diplomová práce, VUT- BRNO, Ústav strojírenské technologie, r.2011, 65 s.
- [3] NOVÁK, M. *Analýza tvářecích parametrů skružování ocelových trubek*, Diplomová práce, VŠB-TU Ostrava, Katedra mechanické technologie, r.2009, 72 s.
- [4] RIESNER, J. *Vyhodnocení materiálových charakteristik při statických a dynamických zkouškách*, Diplomová práce, VUT-Brno, Ústav strojírenské technologie, r.2010, 74 s.
- [5] BŘEZINA, R. *Technologie I*, VŠB-TU Ostrava, r.2000, 78 s.
- [6] PETRUŽELKA, J. HRUBÝ, J. *Výpočetní metody ve tváření*, VŠB-TU Ostrava, r.2002, 173 s.
- [7] HRUBÝ, J. *Silové poměry při ohýbání trubek v kladkové ohýbačce*, Analytická zpráva, Jiří Hrubý-inženýrský servis Opava, r.2006, 10 s.
- [8] <http://www.ferona.cz/cze/katalog/mat_normy.php>.
- [9] HRUBÝ, J. *Metoda konečných prvků – 1. panel* [online]. [cit. 2010-04-20]. Dostupné z URL http://www.345.vsb.cz/jirihruby/Vmt/MKP_panel1.pdf>.
- [10] <http://www.allforpower.cz/UserFiles/files/2009/mopoPdf.pdf>
- [11] RENTKA, J. *Analýza technologie ohýbání ocelových trubek za tepla*, VŠB-TU Ostrava, r.2009, 90 s.
- [12] http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/01.htm